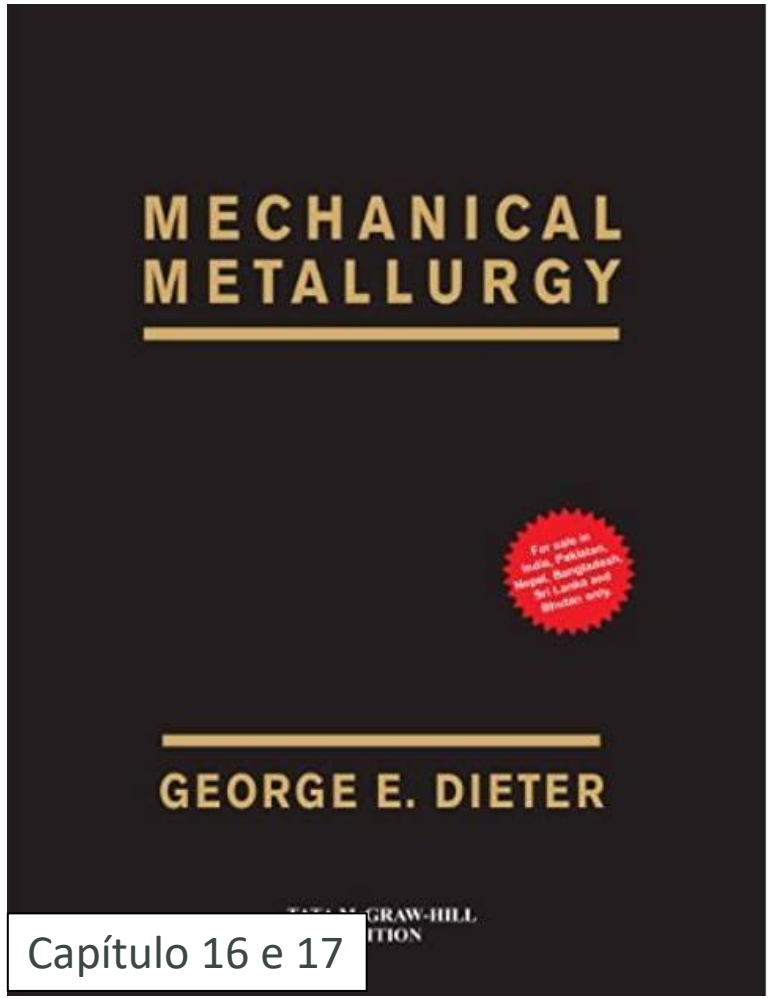
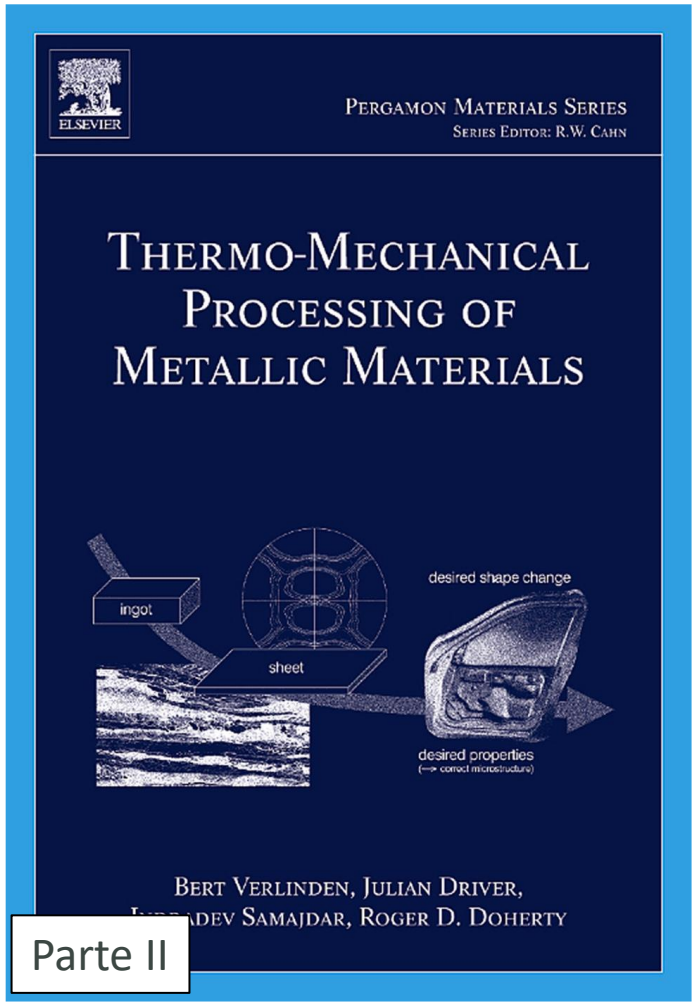
Conformação mecânica 03.222-0

Aula – Forjamento e laminação

Bibliografia



Capítulo 16 e 17



Parte II

Artigos científicos

Processos de conformação de metais

Processos: compressão direta

Forjamento

Laminação

Processos: compressão indireta

Extrusão

Trefilação

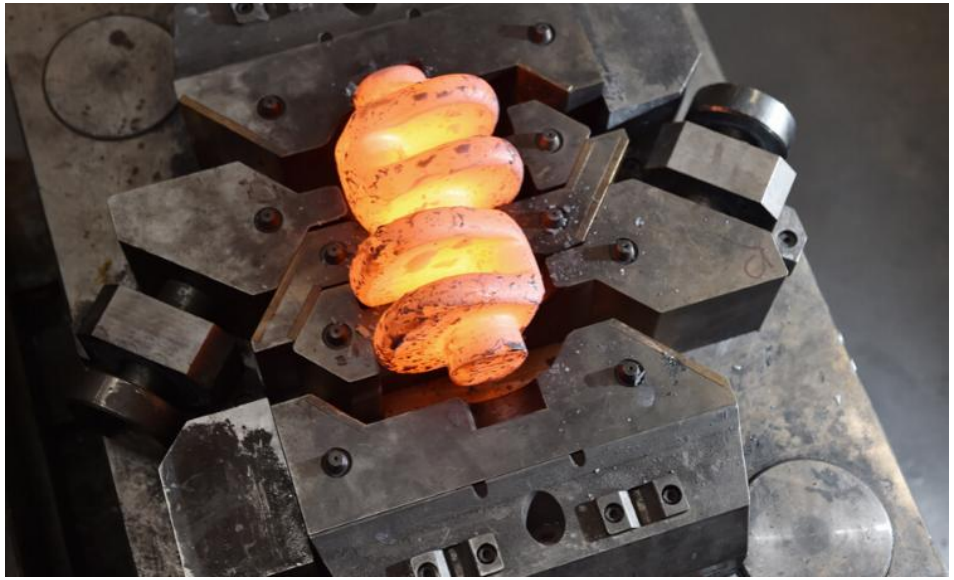
Conformação de chapas

Estiramento

Dobramento

Forjamento

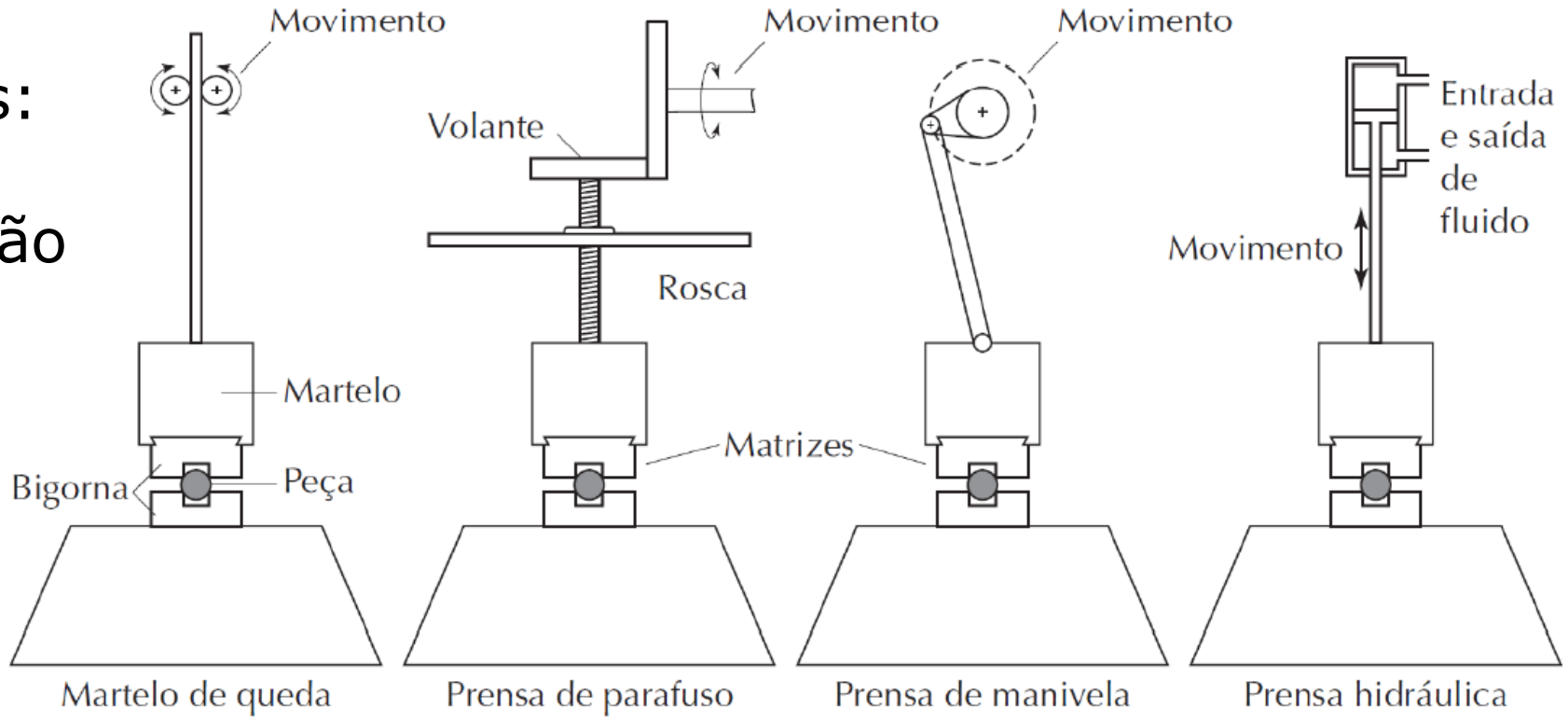
- Processo mais antigo de conformação de metais
- Consiste em operações de compressão tipicamente por prensagem ou martelamento, em que o metal assume o perfil da ferramenta
- Normalmente é realizado em altas temperaturas
- Forjamento em matriz aberta
- Forjamento em matriz fechada



Equipamentos de forja

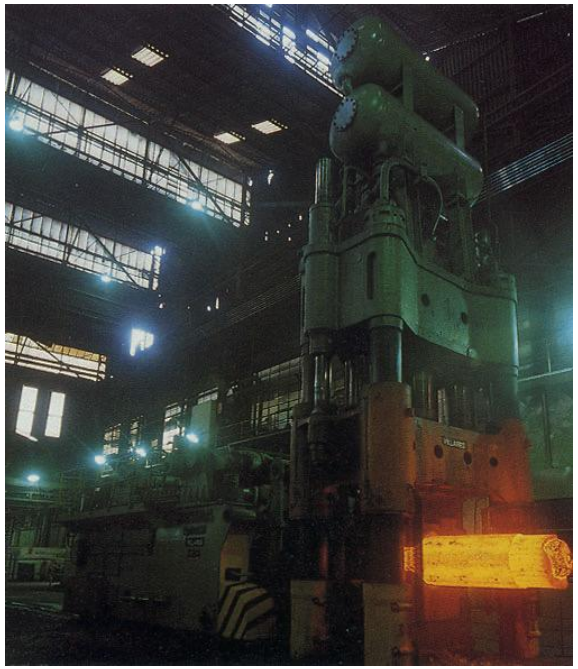
- Martelos de forja: queda de um martelo em direção à peça
- Prensas de forja e hidráulica: limitadas pelo comprimento do êmbolo e carga disponível
- Variáveis importantes: Carga, energia, velocidade de aplicação da carga

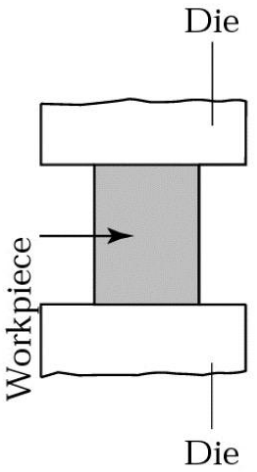
Forging machine	Velocity range, m s^{-1}
Gravity drop hammer	3.6–4.8
Power drop hammer	3.0–9.0
HERF machines	6.0–24.0
Mechanical press	0.06–1.5
Hydraulic press	0.06–0.30



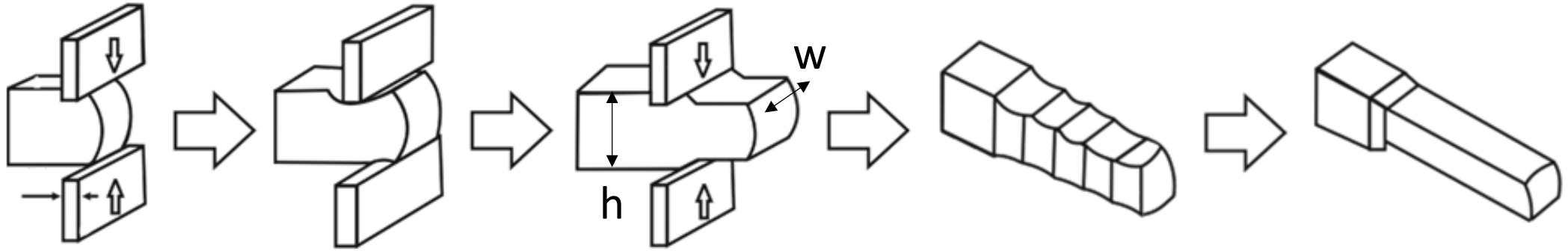
Forjamento em matriz aberta

- Forjamento em matriz aberta: normalmente realizado em etapas iniciais de forjamento
- Forjamento ocorre de forma não confinada
- Aplica-se principalmente para confecção de geometrias simples
- Peças de grande dimensão
- Número relativamente baixo de peças
- Tolerâncias e acabamentos grosseiros





Estiramento de barra



- Ferramenta será menor do que o comprimento da barra: compressão com espalhamento lateral
- Coeficiente de espalhamento, S

  Mede **quanto da deformação total** (variação de espessura) se traduz em **aumento da largura**.

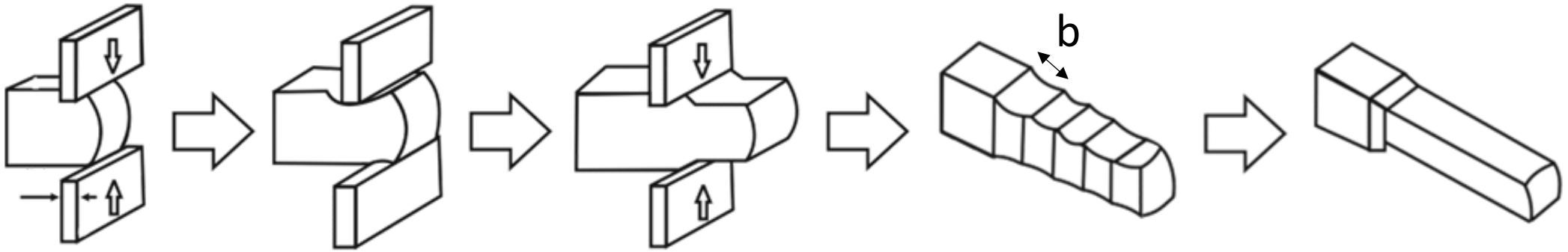
$$S = \frac{aumento\ da\ largura}{redução\ da\ espessura} = \frac{\ln\left(\frac{w_1}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)}$$

- Coeficiente de alongamento, C

  Mede **quanto da deformação total** se converte em **aumento de comprimento**.

$$C = 1 - S = \frac{aumento\ do\ comprimento}{redução\ da\ espessura} = \frac{\ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)}$$

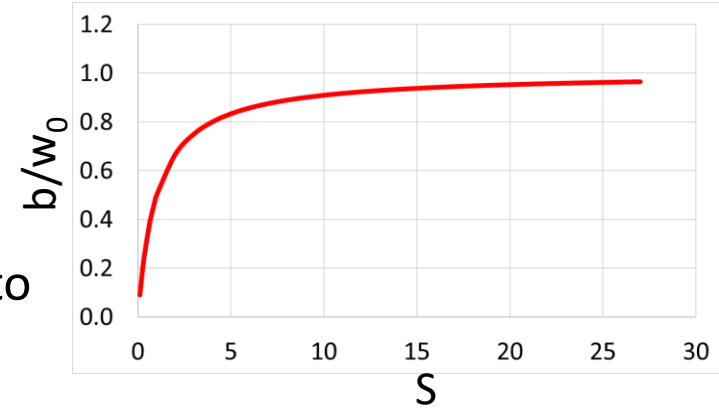
Estiramento de barra



$$S = \frac{\ln\left(\frac{w_1}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)}$$

- Se S = 1: espalhamento completo na largura (C = 0) e se S = 0: toda a deformação será no alongamento (C = 1)
- S dependerá da "razão de mordida" b/w_0 (sendo que b é o comprimento de contato da matriz com a peça)

$$S = \frac{b/w_0}{1 + b/w_0}$$



- Lei de espalhamento

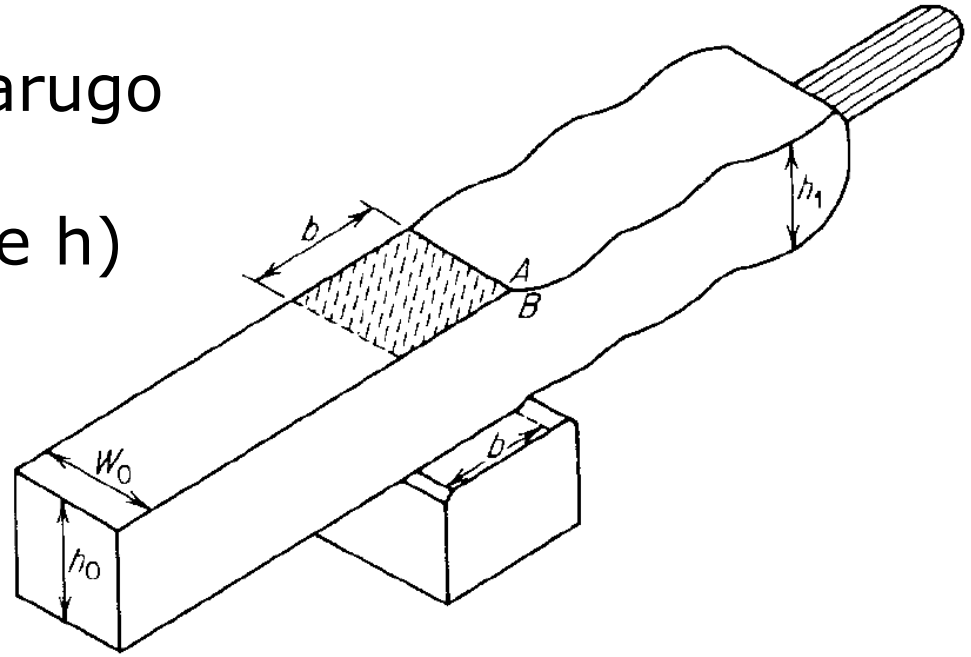
$$\beta = \left(\frac{1}{\gamma}\right)^S$$

$\beta = w_1/w_0$ - razão de espalhamento

$\gamma = h_1/h_0$ - razão de prensagem

Estiramento de barra

- b/h deve ser maior do que 1/3 para que o tarugo não seja deformado de forma heterogênea (grandes valores de b ou menores valores de h)



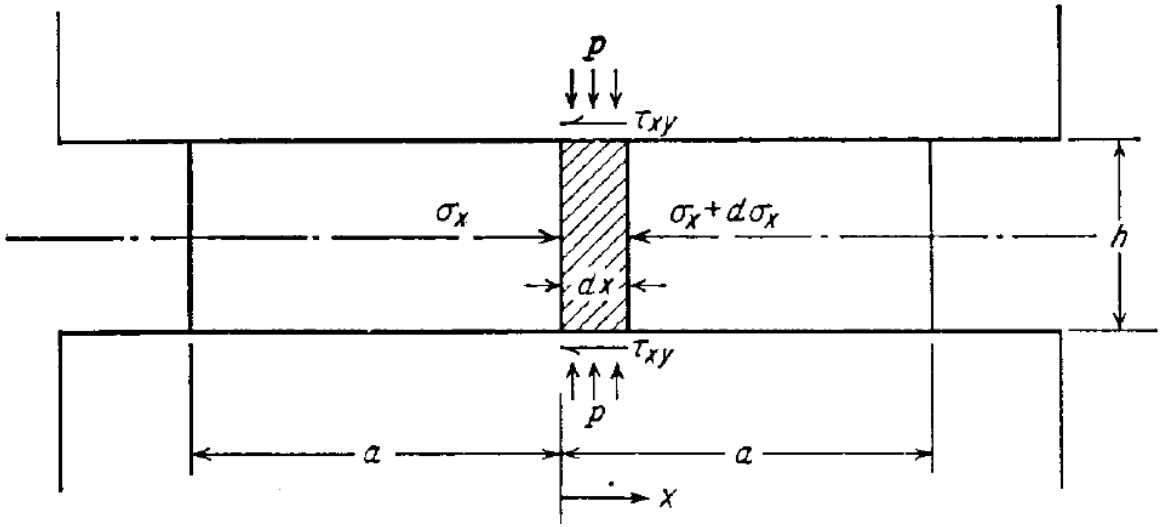
- Carga necessária para forjamento livre

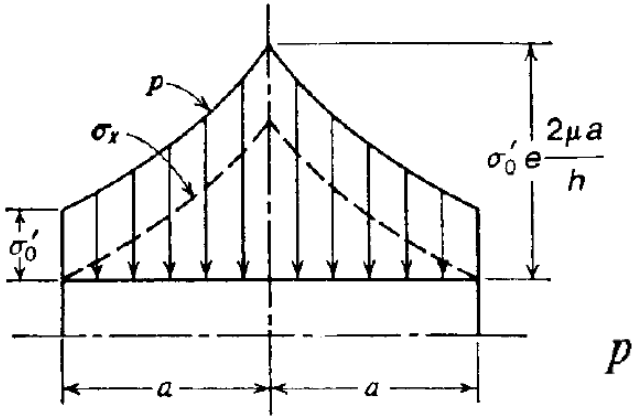
$$P = \bar{\sigma}\, A\, C$$

- C corresponde ao fator de restrição para def. heterogênea
- Lembrando que a tensão para o escoamento será maior quanto maior o valor de Δ (espessura média / comprimento de def.)

$$\Delta = \frac{h}{L}$$

Forjamento em estado plano de deformação

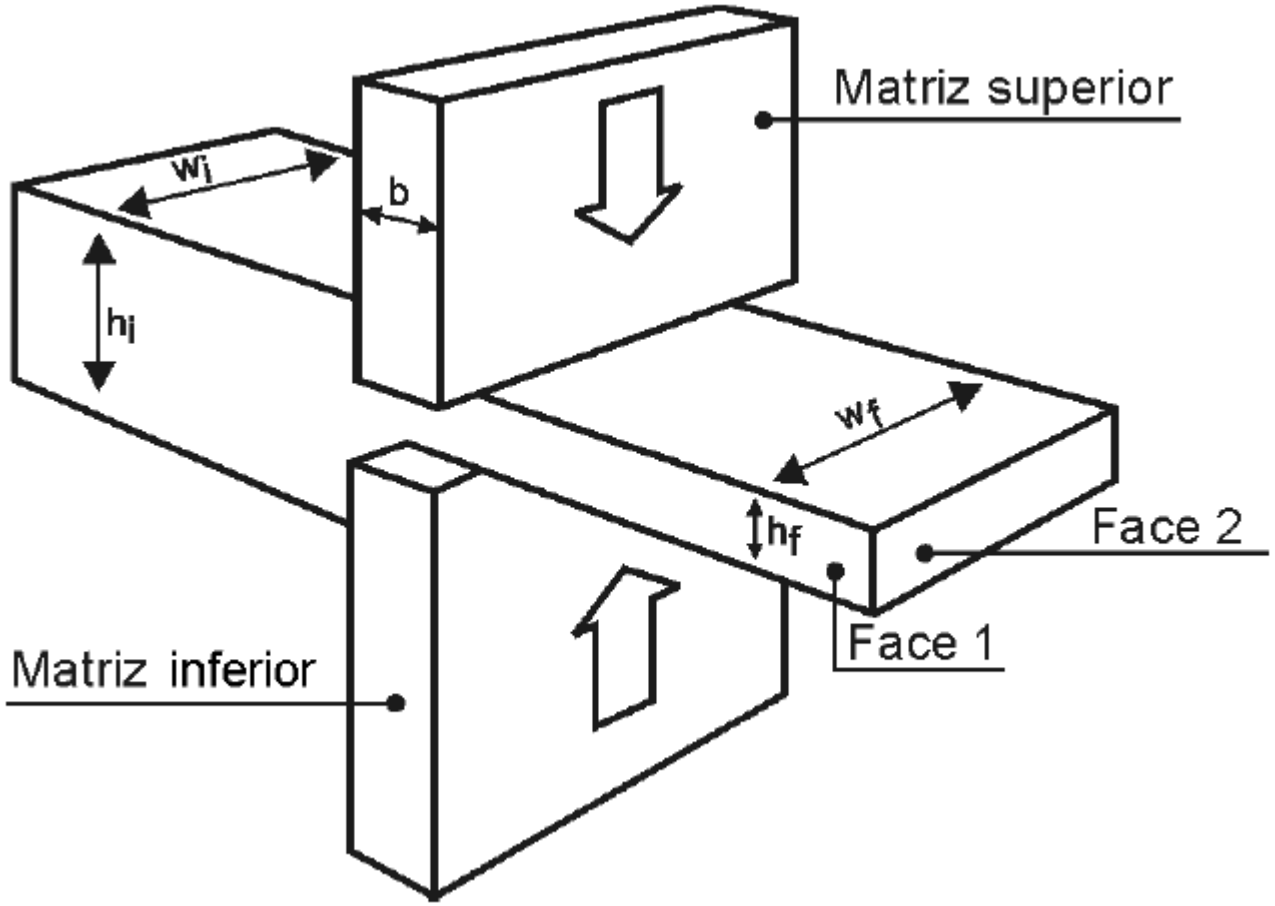


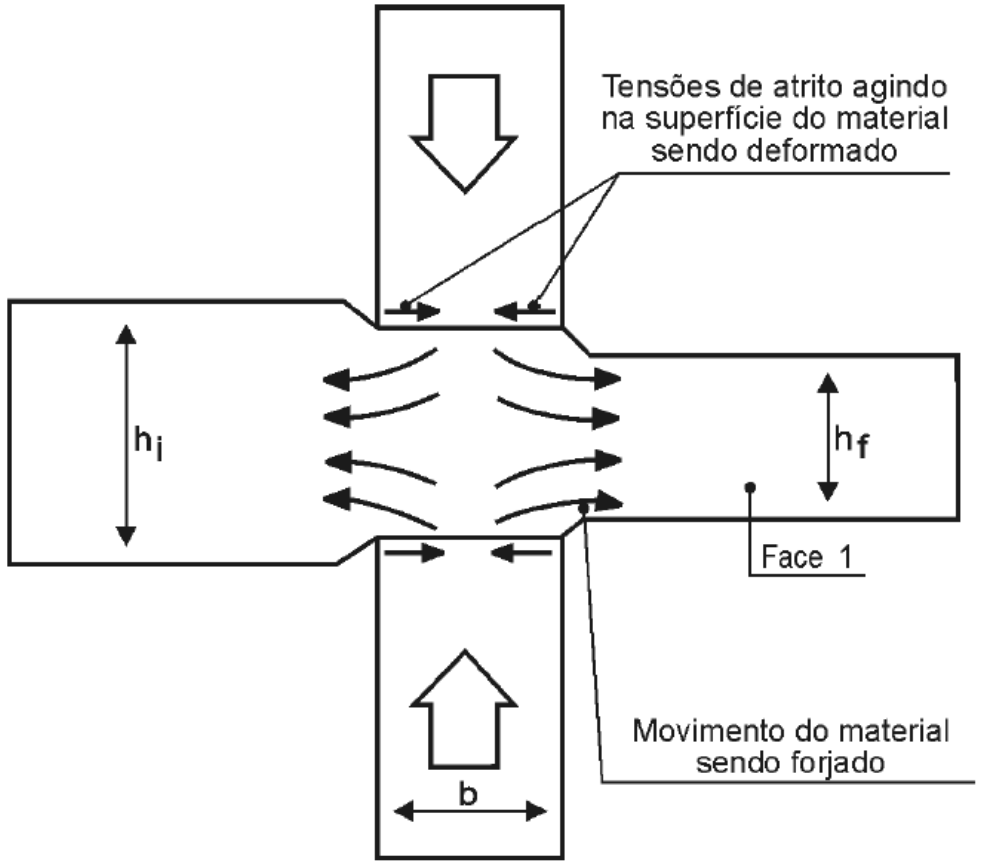


$$p = \sigma_0' \left[1 + \frac{2\mu(a - x)}{h} \right]$$

- Supondo uma placa com comprimento elevado (comparado à espessura e à largura) – estado plano de deformação
- Atrito gerado entre a matriz e a peça será direcionado ao centro da placa (oposição ao fluxo de metal)
- Quanto maior L/h (L=2a) -> maior a pressão de forjamento necessária
- Metal estacionário na superfície neutra (linha central)
- Pressão vertical cresce das bordas para o centro

Cálculo dos esforços no forjamento

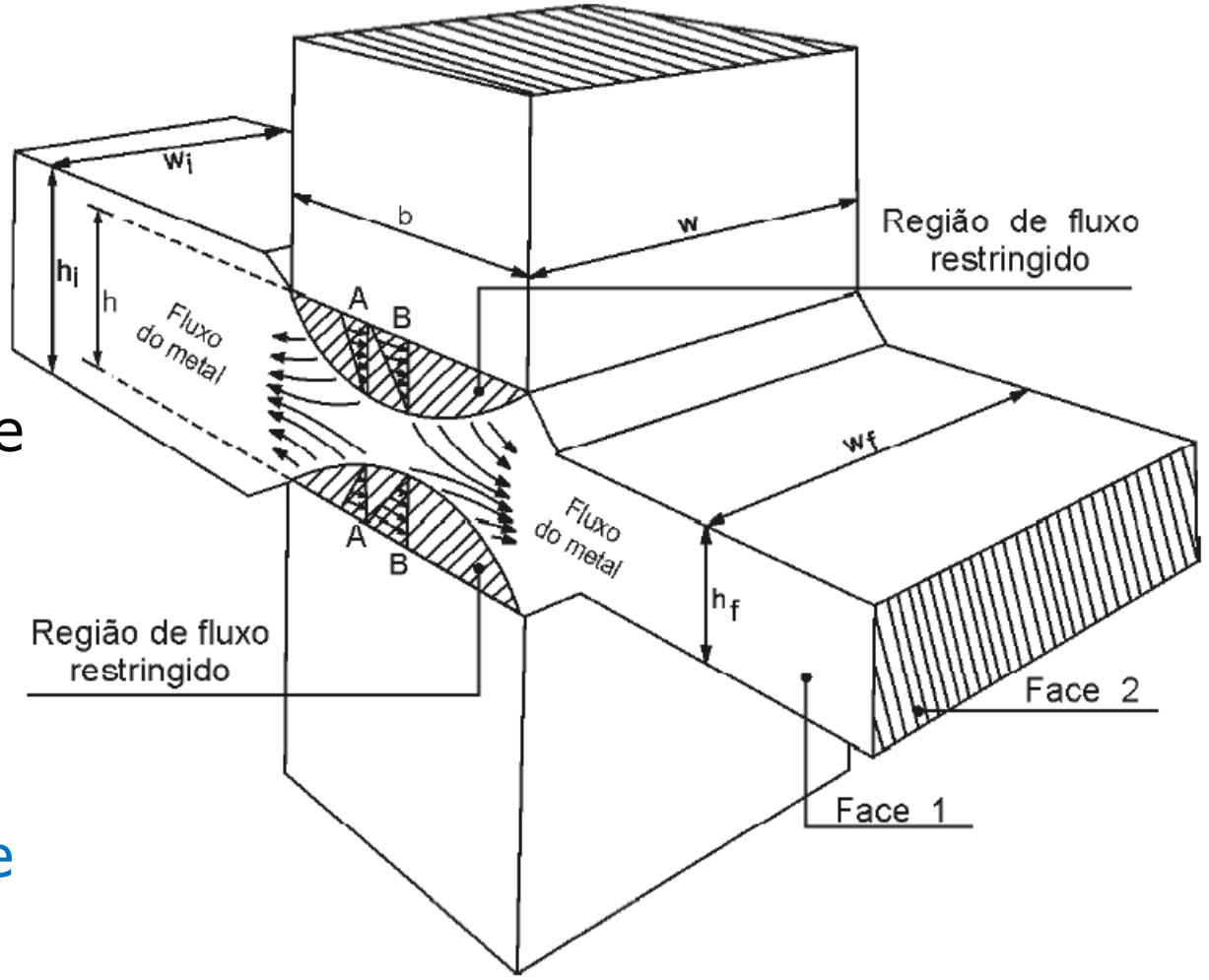




* As tensões de atrito se opõem ao estiramento da peça

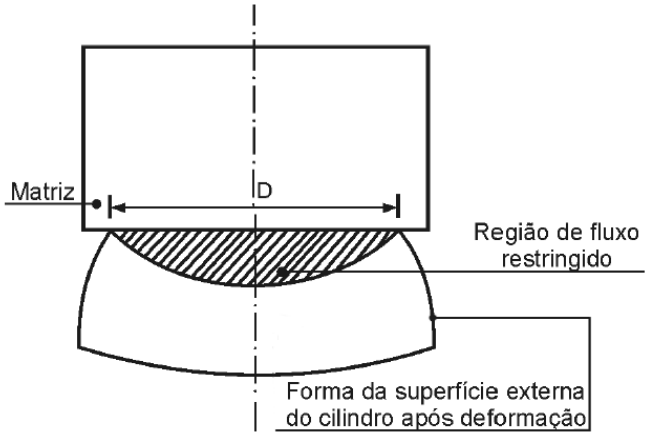
Cálculo dos esforços no forjamento

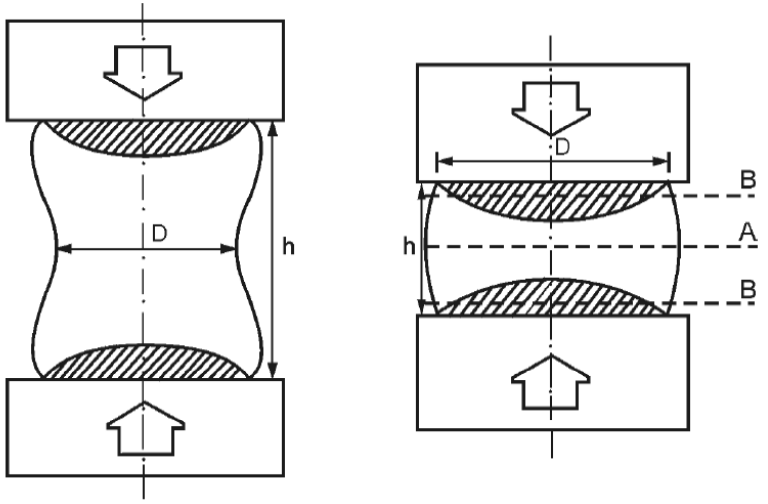
- Pressões verticais sobre a peça forjada crescem das bordas para o centro
- **Restrições** devido ao atrito geram uma zona de fluxo restringido
- Regiões de fluxo restringido: regiões que são mais difíceis de se deformar do que o material ao redor
- Quanto maiores as pressões, mais profundas serão essas regiões
- Quanto maior o atrito, maior a região de fluxo restringido



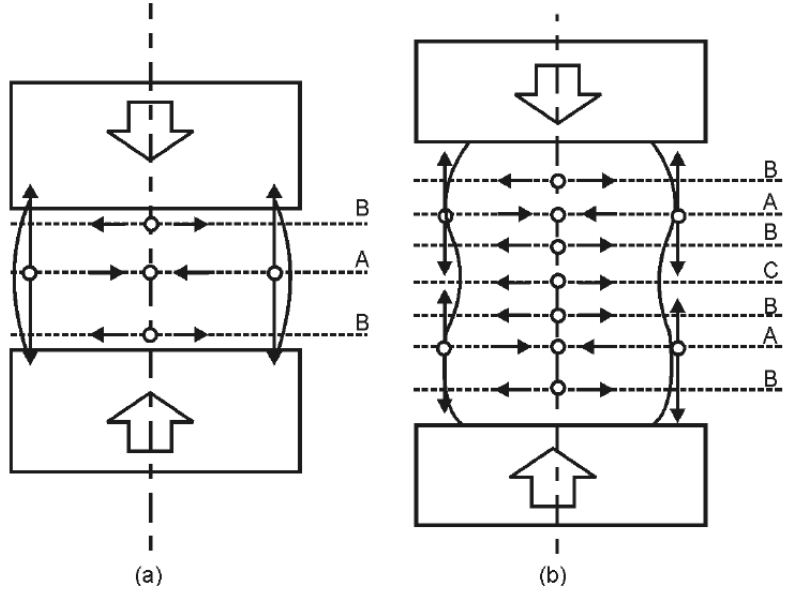
Operação de recalque

- Recalque de cilindros com diferentes relações D/h
- Para cilindros com D/h > 0.65: região de fluxo restringido se forma, material em A tende a expandir mais do que B – compressão no centro: componente hidrostática em compressão nessa região



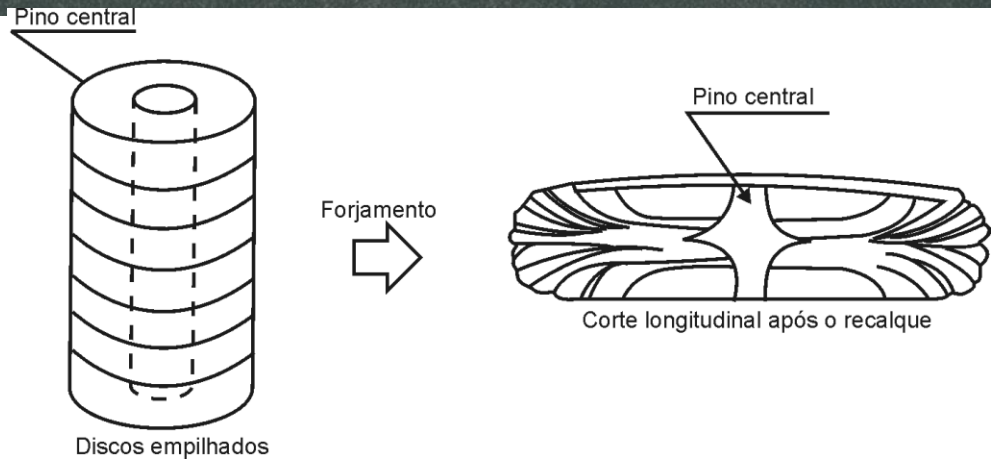


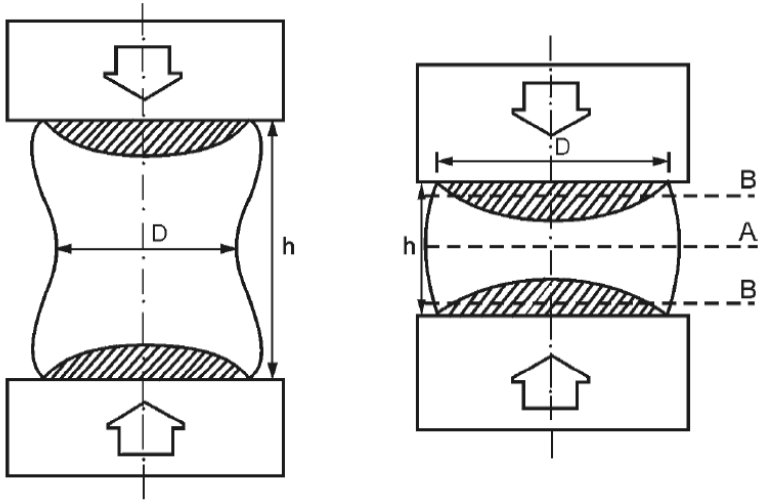
Tensões induzidas



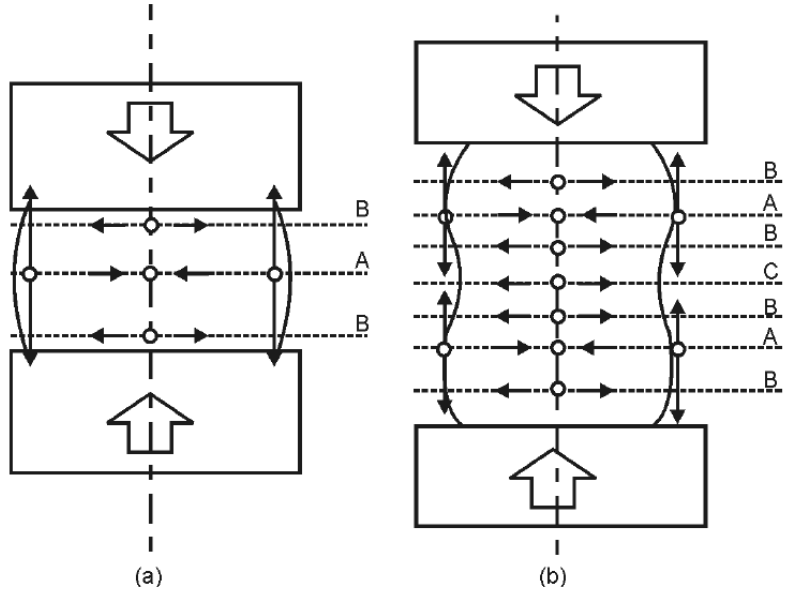
Operação de recalque

- Para cilindros com D/h < 0.65 (ou seja, ↑h): região de fluxo restringido fica <u>restrita à região próxima à matriz</u> – compressão fora do centro: redução do diâmetro no centro e tensões trativas são resultantes (plano C)



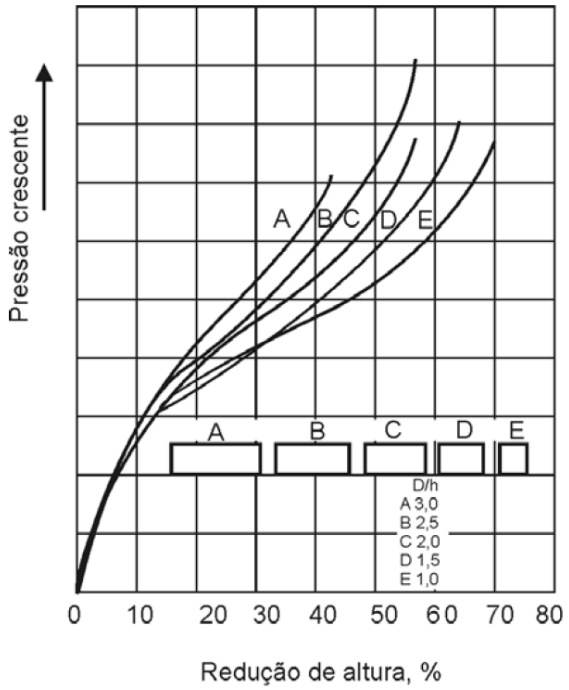


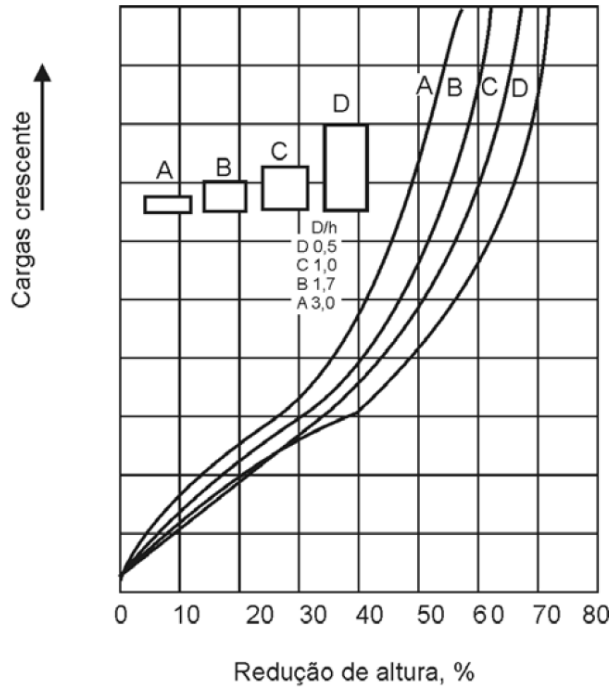
Tensões induzidas

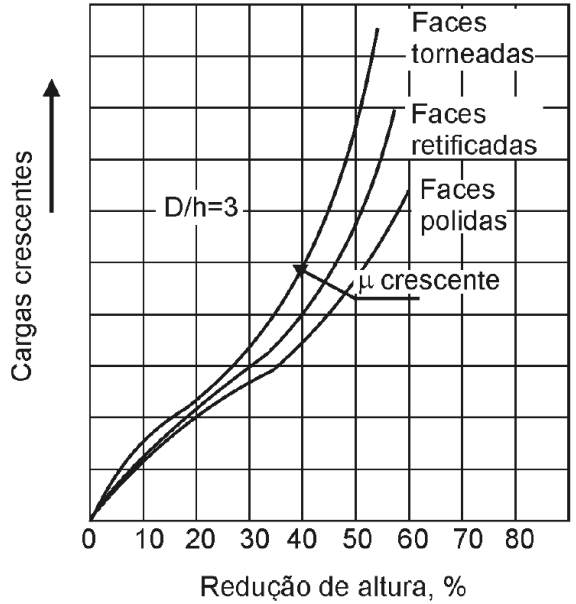


Cálculo dos esforços no forjamento

- Zonas de fluxo restringido: atuação como "falsas matrizes"
- D/h elevado: forma pouco bojada e grande parte do volume estará na zona de fluxo restringido: elevadas pressões são necessárias -> "endurecimento geométrico"
- D/h pequeno: formação de formas côncavas ou convexas -> redução no atrito e redução na pressão devido à deformação heterogênea
- Fenômenos observados em cilindros também se aplicam ao estiramento

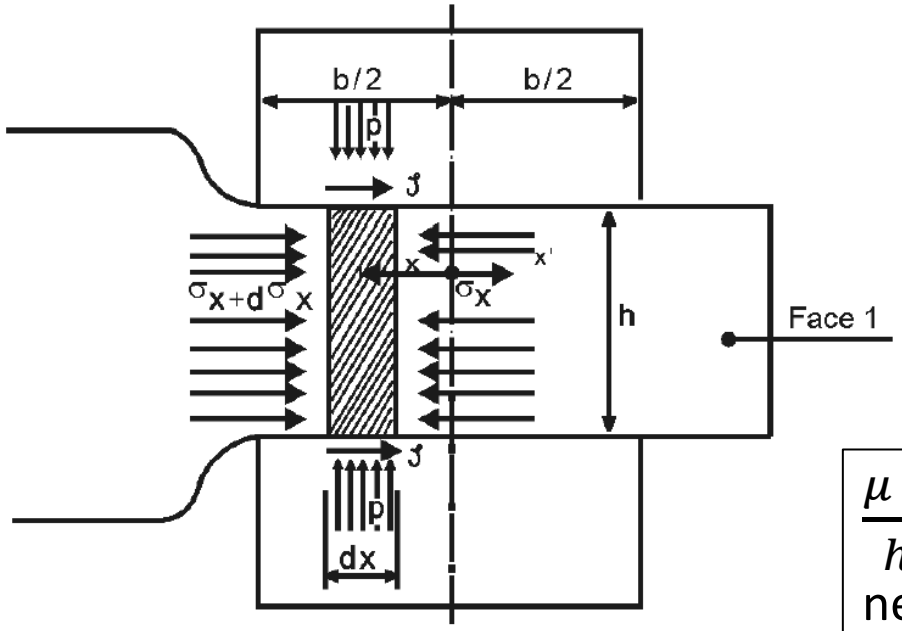


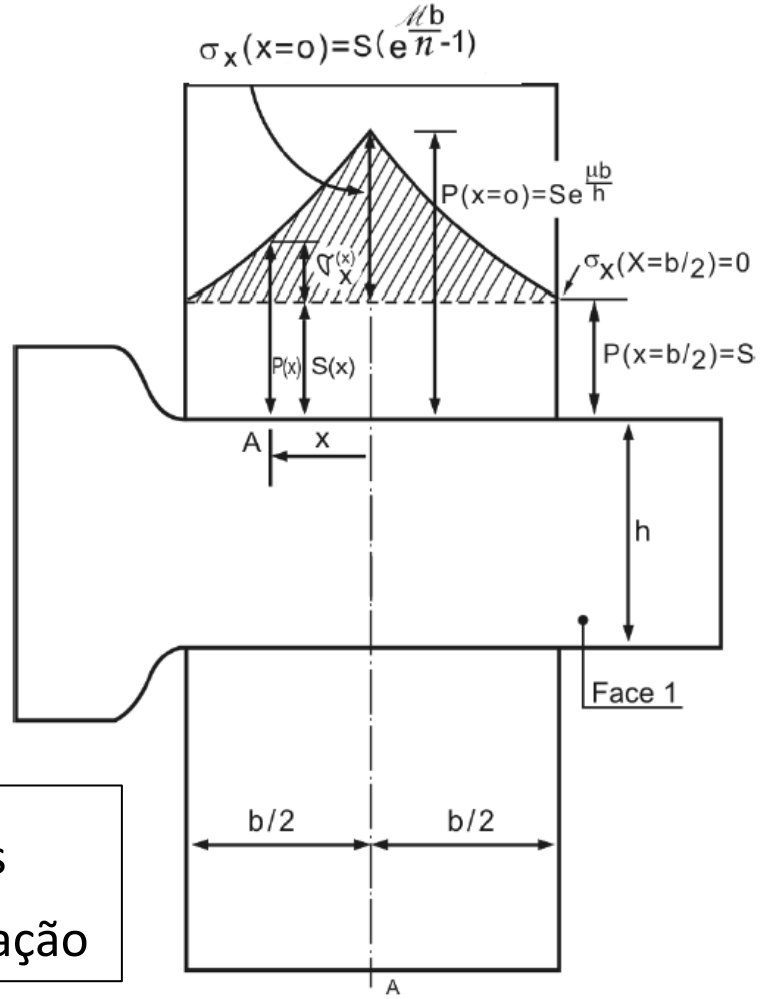




Quanto **menor** o atrito, **menor** será o efeito de endurecimento geométrico pela menor formação de zona de fluxo restringido

Cálculo dos esforços no forjamento





$\frac{\mu\, b}{h}$ elevado: altas pressões necessárias para a deformação

$$\bar{P} = \bar{\sigma}\frac{1}{\frac{\mu\, b}{h}}\left(e^{\frac{\mu\, b}{h}} - 1\right)$$

$$\bar{P} \approx \bar{\sigma}\left(1 + \frac{\mu\, b}{2h}\right)$$

$\bar{P}$ será a pressão média agindo sobre a superfície

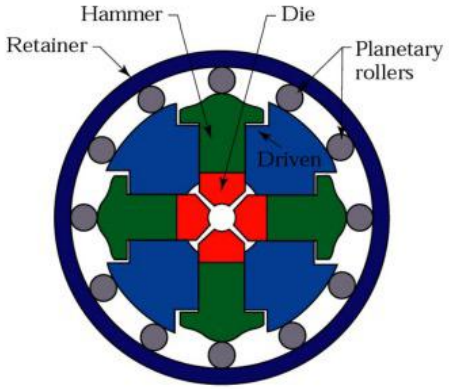
$\bar{\sigma}$ tensão de escoamento do material de acordo com Von Mises

b e h são as dimensões envolvidas

μ é o coeficiente de atrito

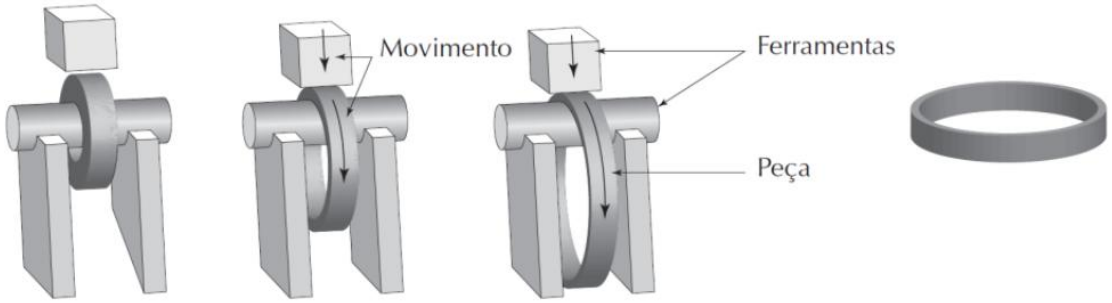
Outros tipos de forjamento em matriz aberta

- Forjamento rotativo

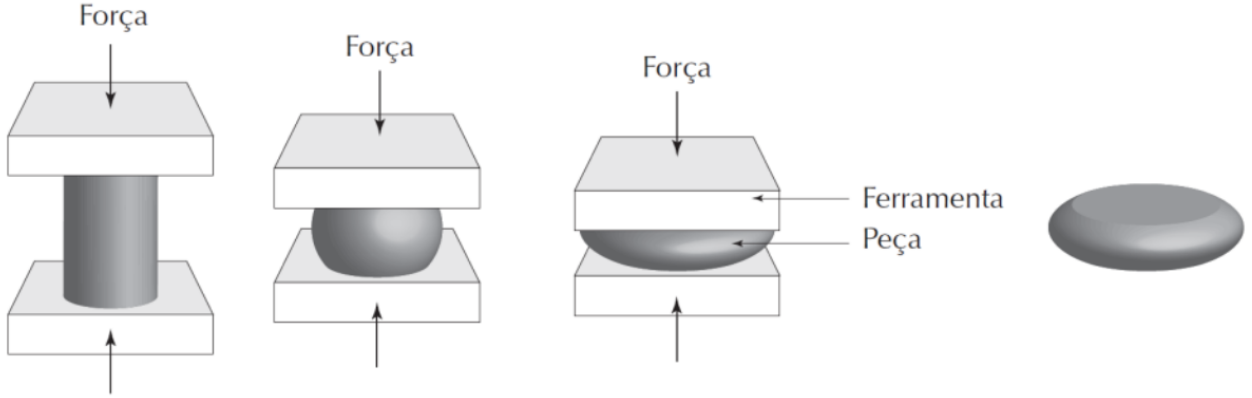


Fonte: Giorgini (2013).

- Forjamento de anéis

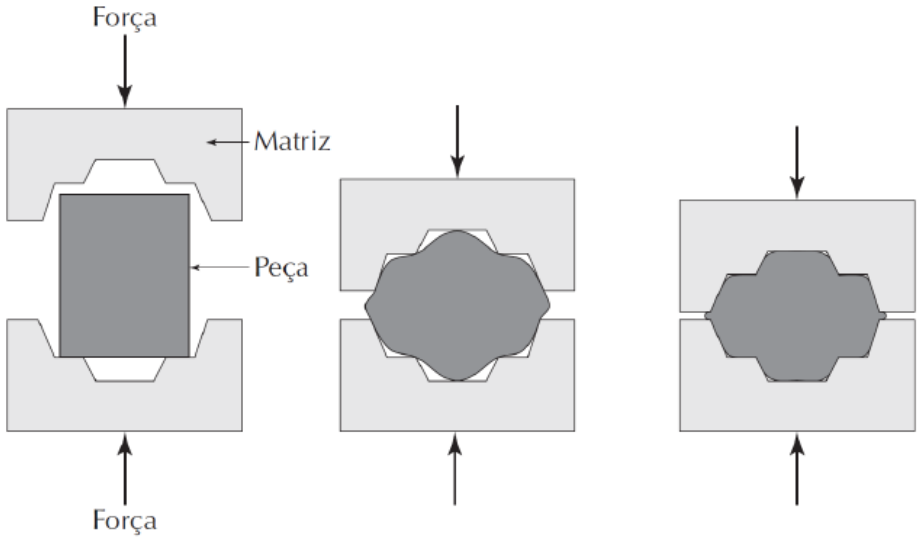


- Recalque



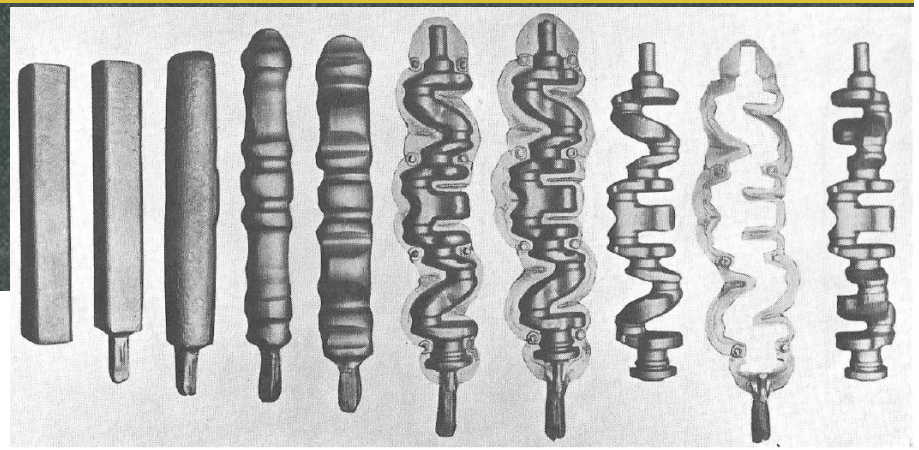
Forjamento em matriz fechada

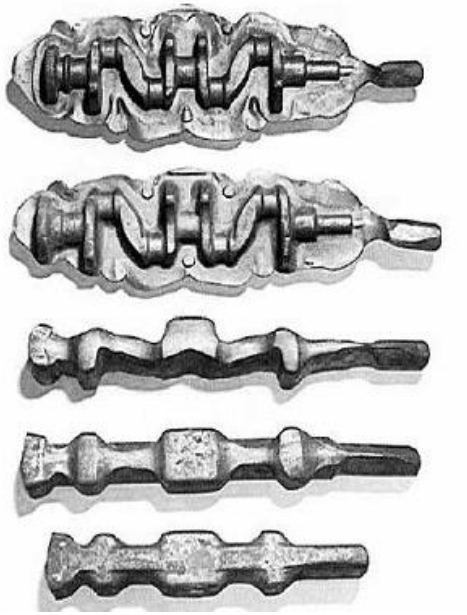
- Forjamento em matriz fechada: aplica-se a etapas intermediárias e finais do forjamento
- Fortes restrições ao livre espalhamento do material
- Matriz em duas metades que possuem o modelo no formato da peça
- Sucesso do forjamento em matriz fechada depende do conhecimento: fluxo de metal, tensão de escoamento, condições de atrito
- **Problema comum:** rápido resfriamento no contato com a matriz

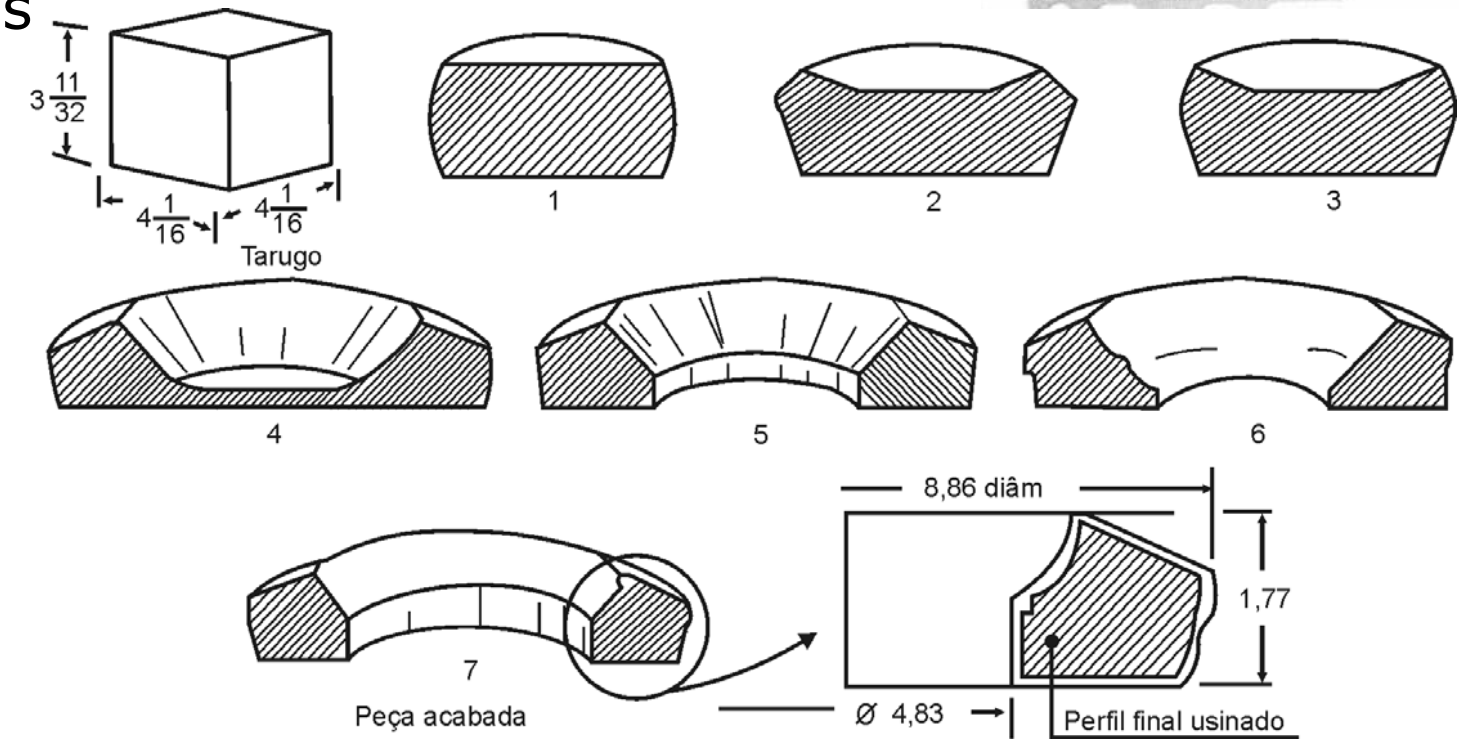


Forjamento em matriz fechada

- Normalmente ocorrem em diversas etapas
- Pode-se usinar diversas cavidades em apenas uma matriz
- Impressões preparadoras e acabadoras
- Peças de variadas dimensões
- Elevada produtividade
- Boas tolerâncias e acabamento superficial

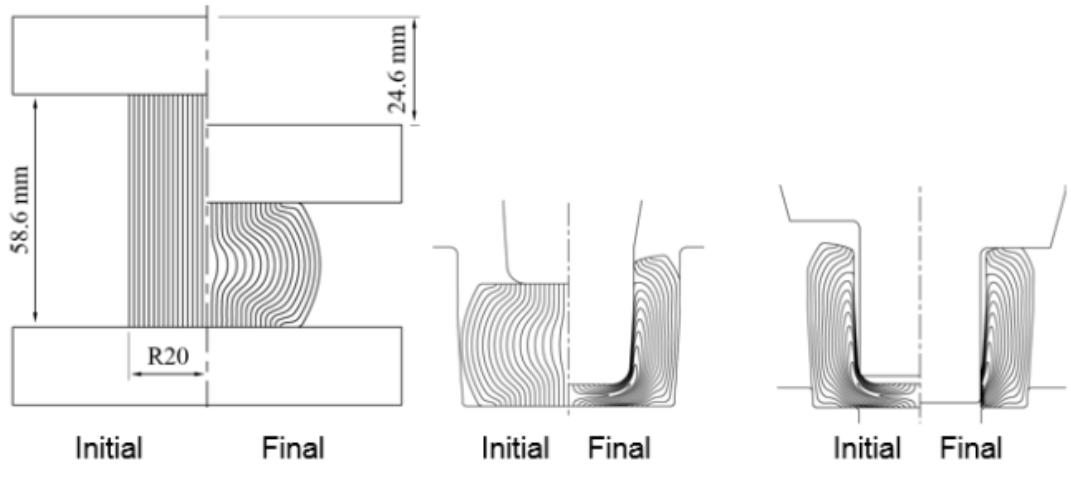


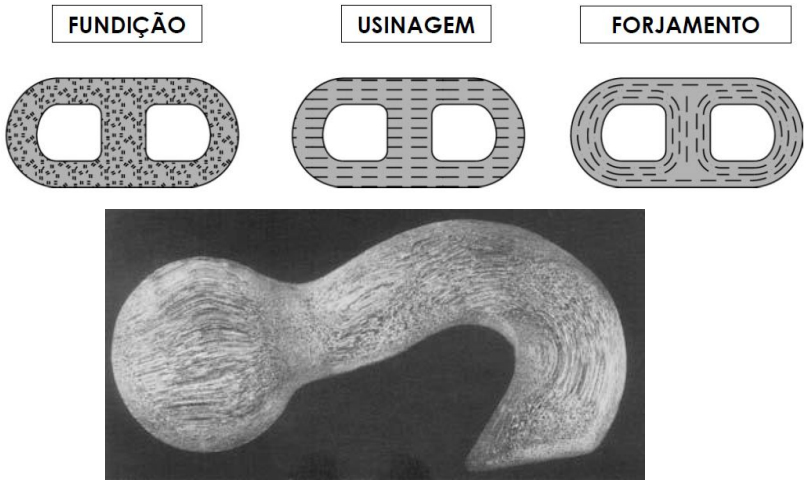


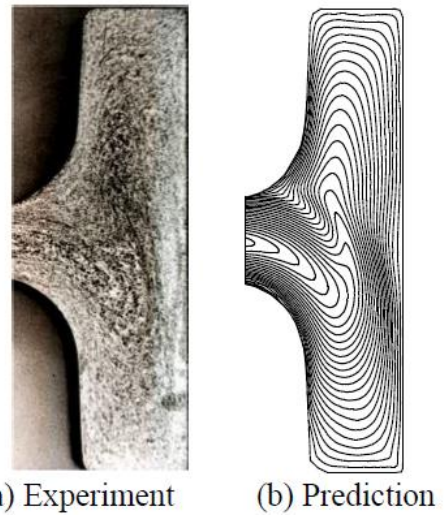


Formação de linhas de fluxo no material

- Escoamento do metal: extrusão (escoamento paralelo à direção da matriz) ou recalcamento (escoamento perpendicular à direção da matriz)
- Detecção de linhas neutras: metal escoa lateralmente à superfície neutra e perpendicular à matriz
- Linhas de partição e fluxo de metal: linhas em que ocorre o fluxo de metal e direcionamento dos grãos e defeitos



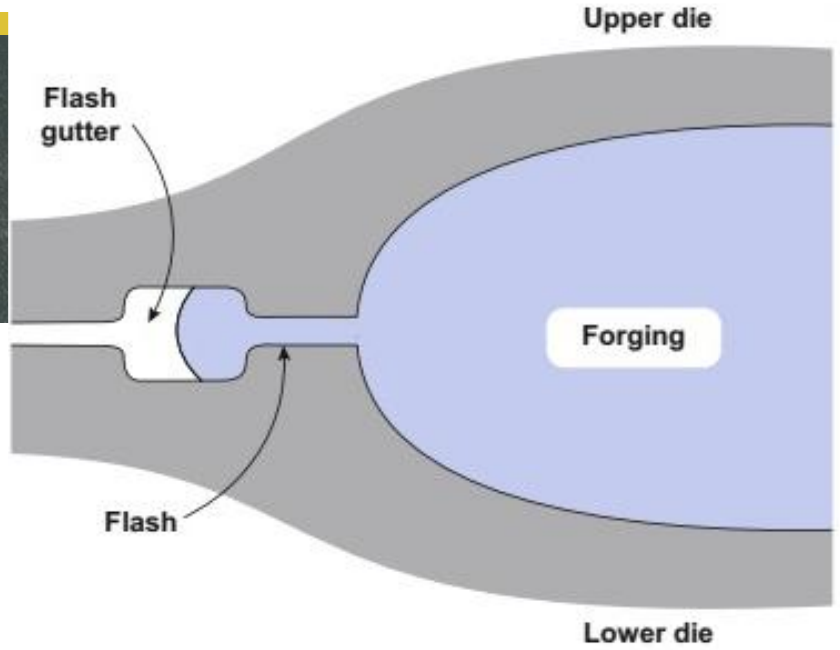


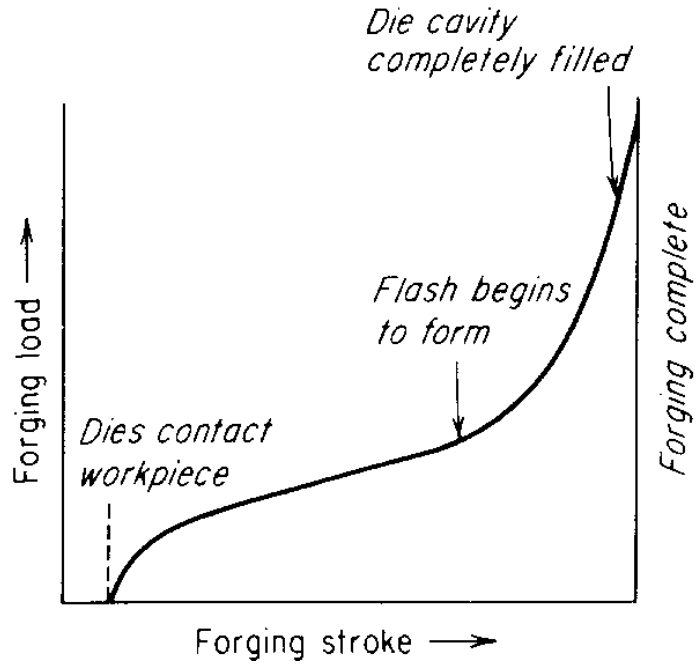


Rebarbas

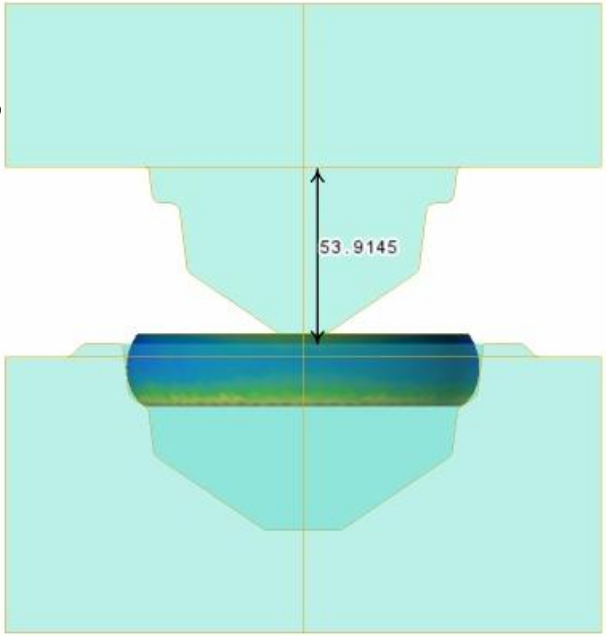
- **Projeto:** quantidade de material deve ser maior do que o necessário para o preenchimento da matriz (volume)
- Rebarba: excesso de material que ficará entre as matrizes ao final da operação
- **Duas funções:** válvula de segurança para o metal preencher a cavidade da matriz e regulação do escape de material
- Quando há formação de rebarba fina, as tensões para escoamento do material aumentam e garantem preenchimento de toda a cavidade

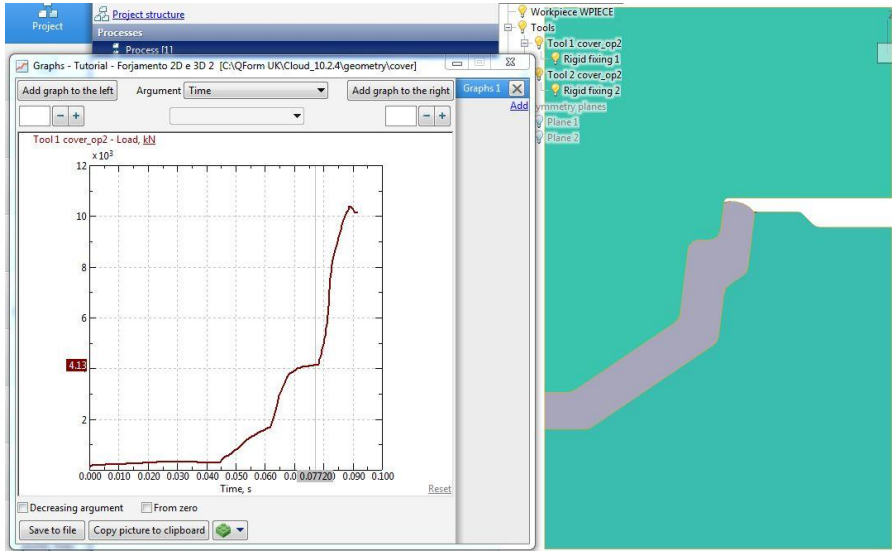
Rebarbas





- Curva típica de carga de forjamento com relação ao preenchimento da matriz
- **Projeto de rebarba:** tensões necessárias para crescer devem ser maiores do que as tensões para preencher a matriz
- Não deve ser muito grande para não aumentar desnecessariamente os esforços da máquina

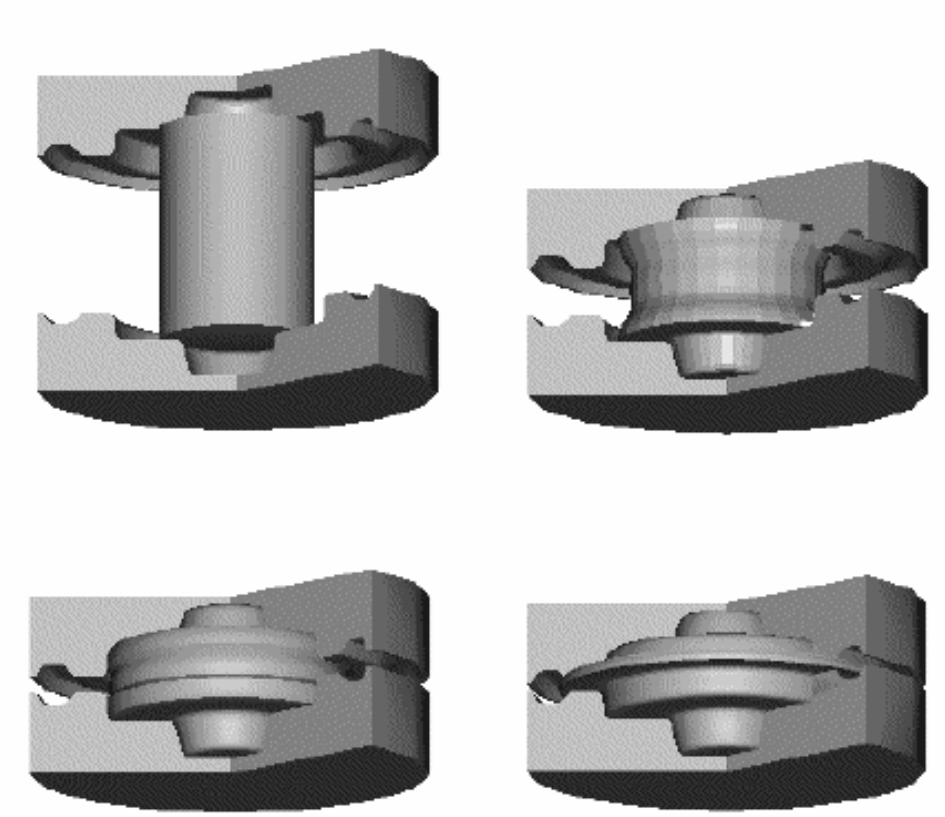




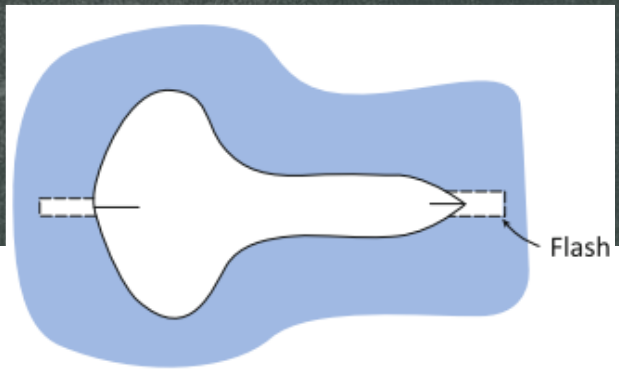
Projeto de peça por forjamento

- Escoamento sem defeitos, preenchimento completo da matriz, perda mínima por rebarbas

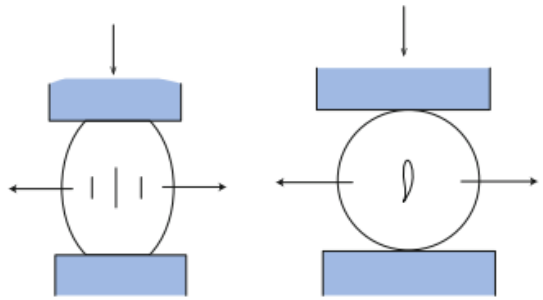
- Variáveis importantes:
  - Volume e peso da peça final
  - Número de etapas de forjamento
  - Dimensões da rebarba
  - Requisitos de carga e energia
  - Tempo de contato: matriz/peça (resfriamento)

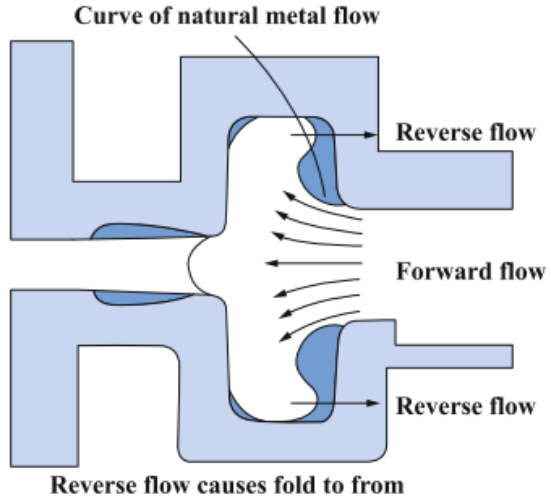


Defeitos

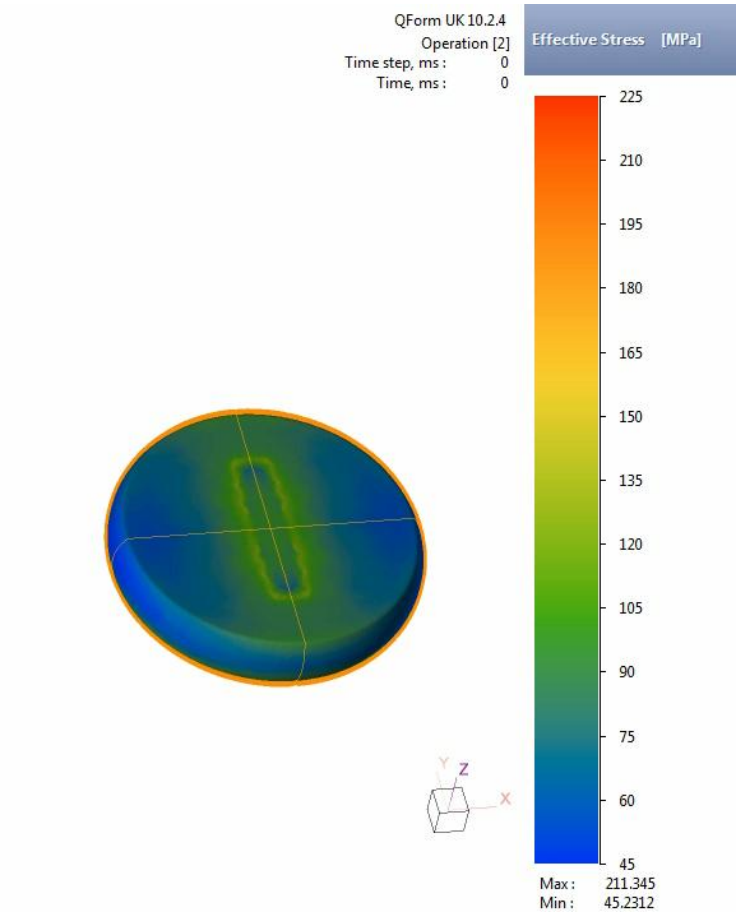


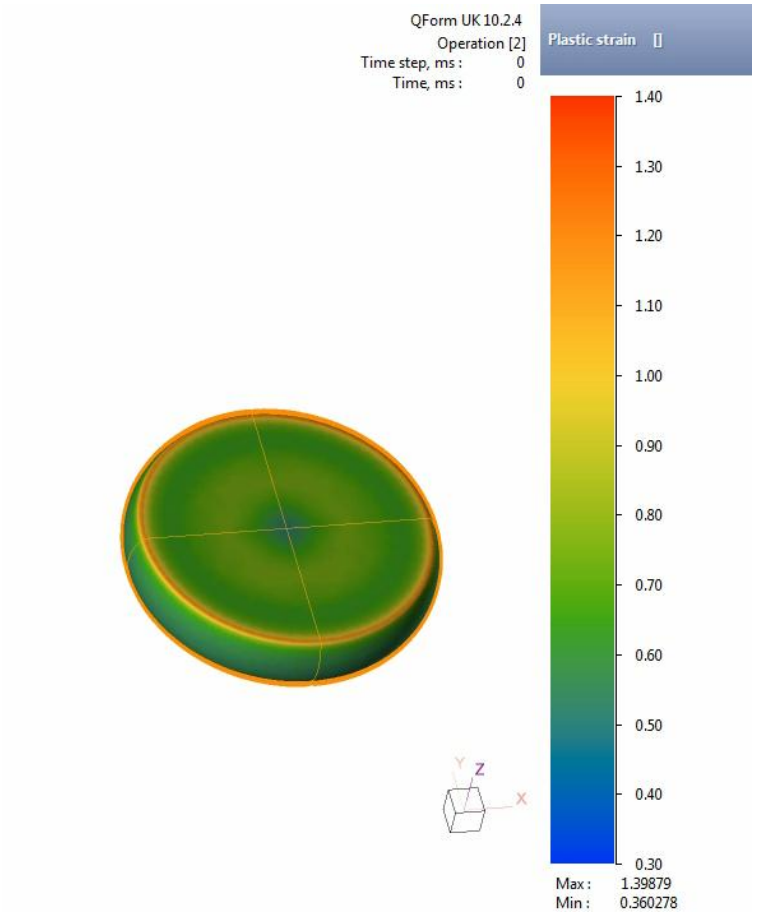
- Deformação superficial em lingotes fundidos: fragmentação e trincas devido à estrutura bruta de fusão
- Trincas superficiais: deformação superficial excessiva devido a baixas temperaturas ou fragilidade a quente
- Trincas de rebarba: quando as cargas excedem a tensão necessária para a fratura da rebarba, ocorrem trincas que podem se prolongar para dentro da peça
- Trincas internas geradas a partir de tensões trativas (matriz aberta – uso de formato côncavo)
- Não-preenchimento do molde
- Presença de inclusões/resíduos de lubrificação
- Gota fria ou dobra: descontinuidade quando duas superfícies dobram entre si (resfriamento excessivo ou atrito elevado)

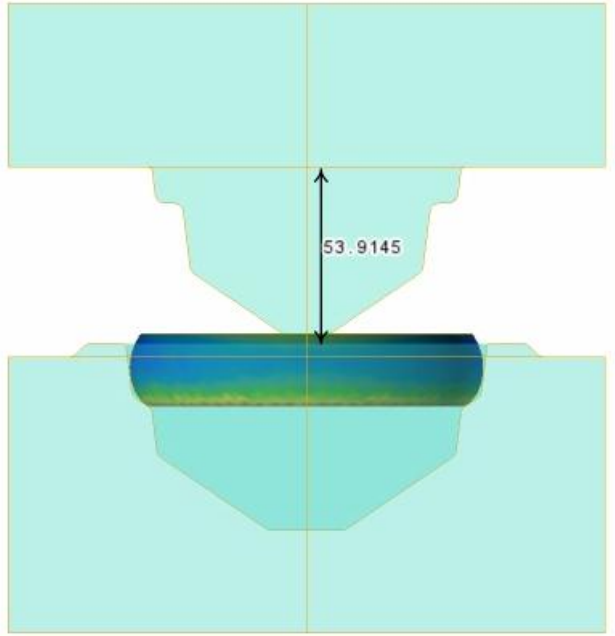


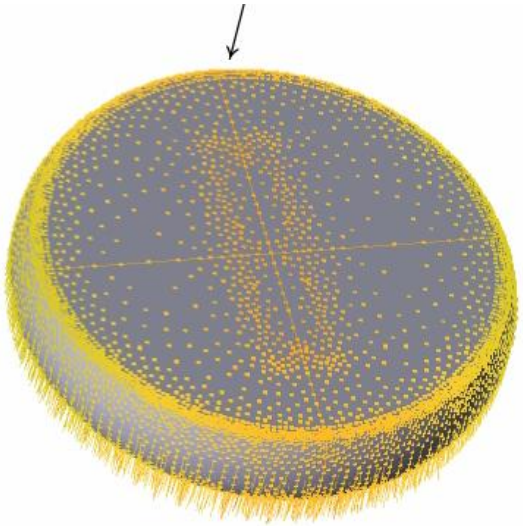


QFORM


QForm UK 10.2.4
Operation [2]
Time step, ms : 0
Time, ms : 0
Effective Stress [MPa]
225
210
195
180
165
150
135
120
105
90
75
60
45
Max : 211.345
Min : 45.2312
Y
Z
X


QForm UK 10.2.4
Operation [2]
Time step, ms : 0
Time, ms : 0
Plastic strain []
1.40
1.30
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
Max : 1.39879
Min : 0.360278
Y
Z
X


53.9145



Processos de conformação de metais

Processos: compressão direta

Forjamento

Laminação

Processos: compressão indireta

Extrusão

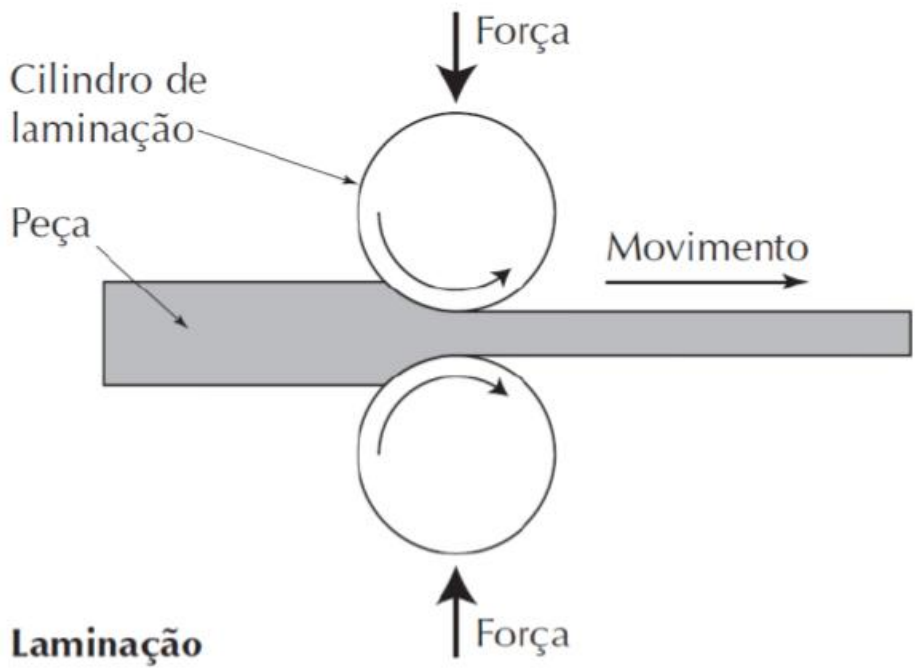
Trefilação

Conformação de chapas

Estiramento

Dobramento

Laminação



- Processo de **deformação plástica** em que o material é forçado a passar entre dois cilindros que giram em sentidos opostos com a mesma velocidade
- Elevada produtividade com bom controle dimensional
- Normalmente é realizado em uma sequência de passes
- Um cilindro pode conter diversos perfis em seu comprimento
- Processo de conformação mecânica mais usado

Laminação

- Tensões compressivas devido à ação dos rolos de laminação
- Tensões de cisalhamento superficiais devido ao atrito entre os rolos e o material – é o cisalhamento quem "puxa" o material para dentro do laminador
- Parâmetros importantes:

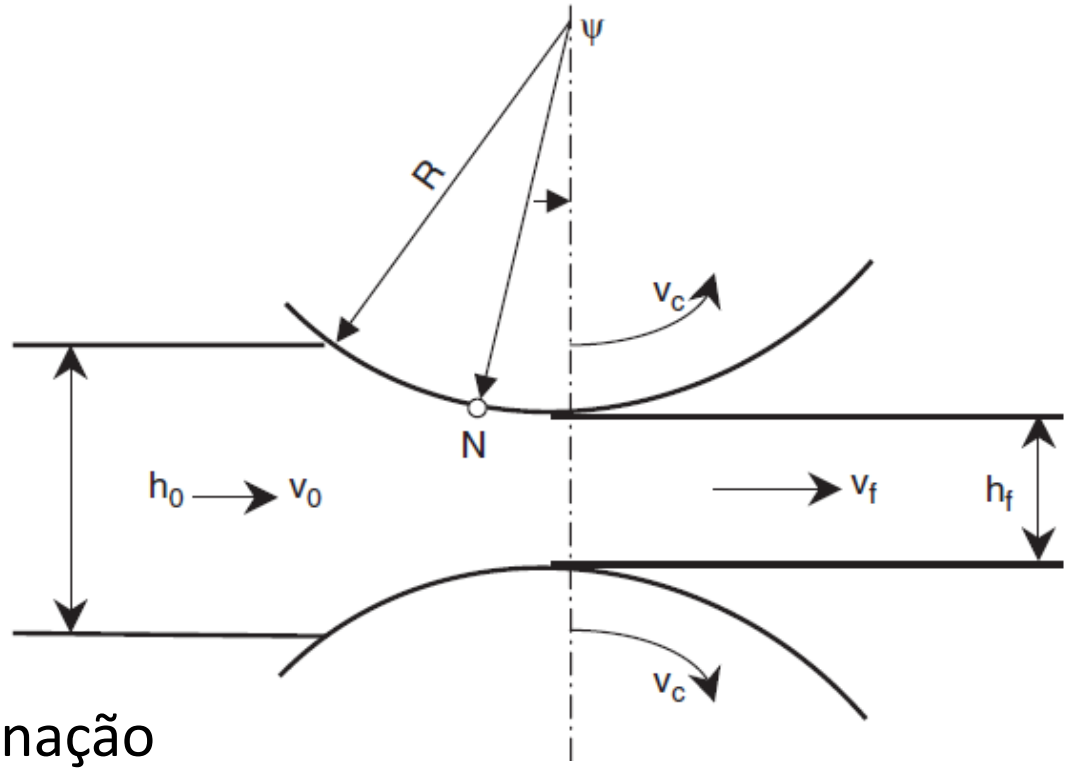
  R – raio do cilindro

  h_0 – espessura inicial antes do processo de laminação

  h_f – espessura final após o processo de laminação

  v_0 – velocidade inicial

  v_f – velocidade de saída

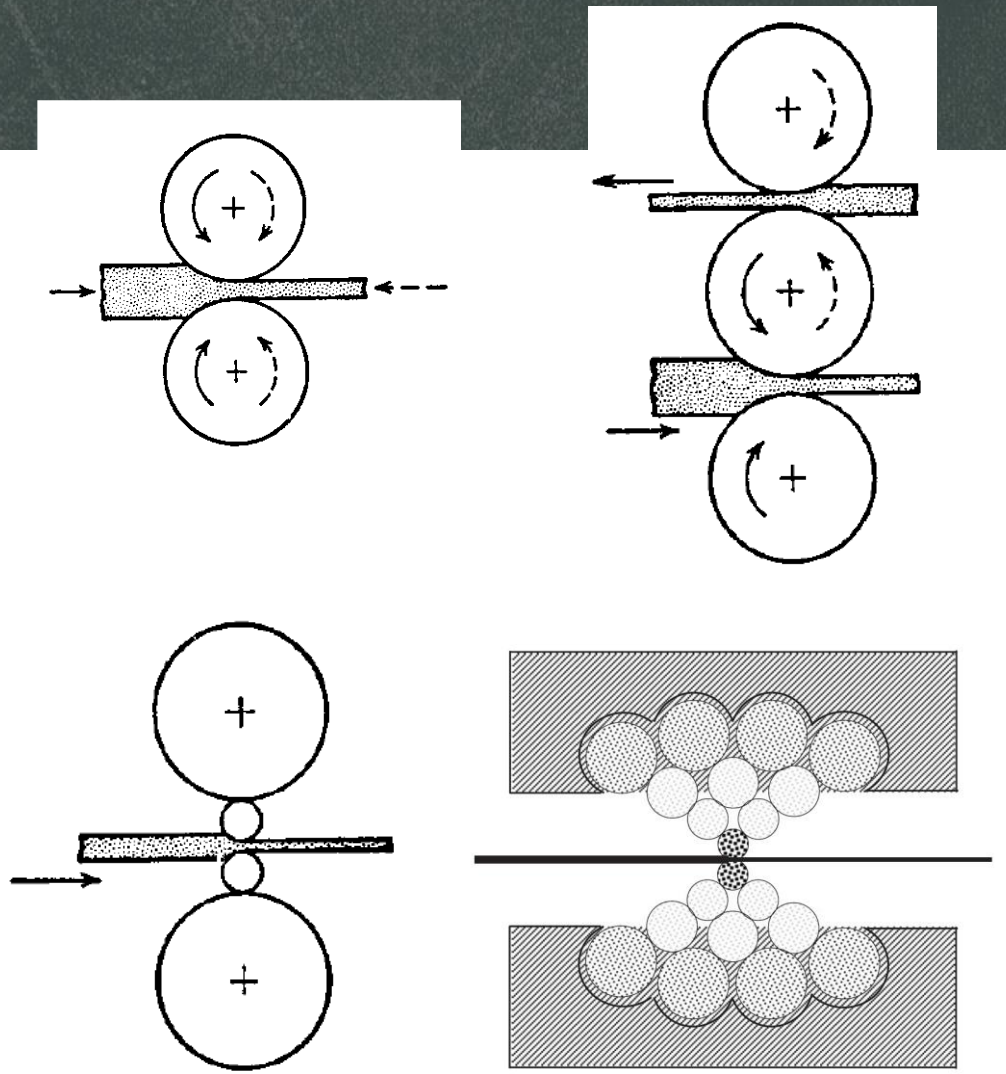


Equipamento para laminação

- Laminadores: rolos laminadores, mancais, carcaça (gaiola) e um motor para fornecer potência

- Tipos: laminador duo, laminador trio, laminador quadruo, Sendzimir

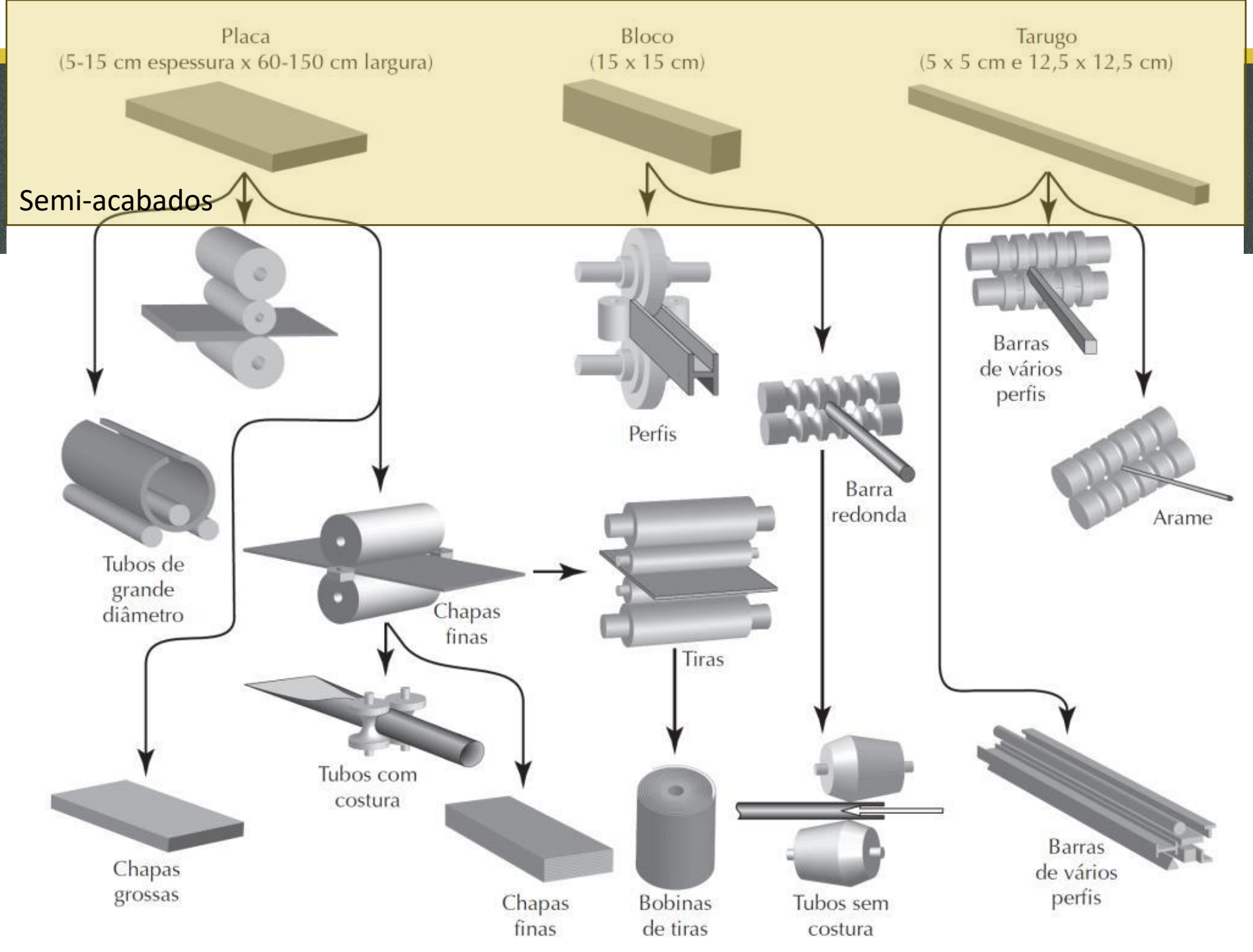
- Redução na espessura: rolos menores -> menos resistentes e maior chance de flexão – suporte de rolos

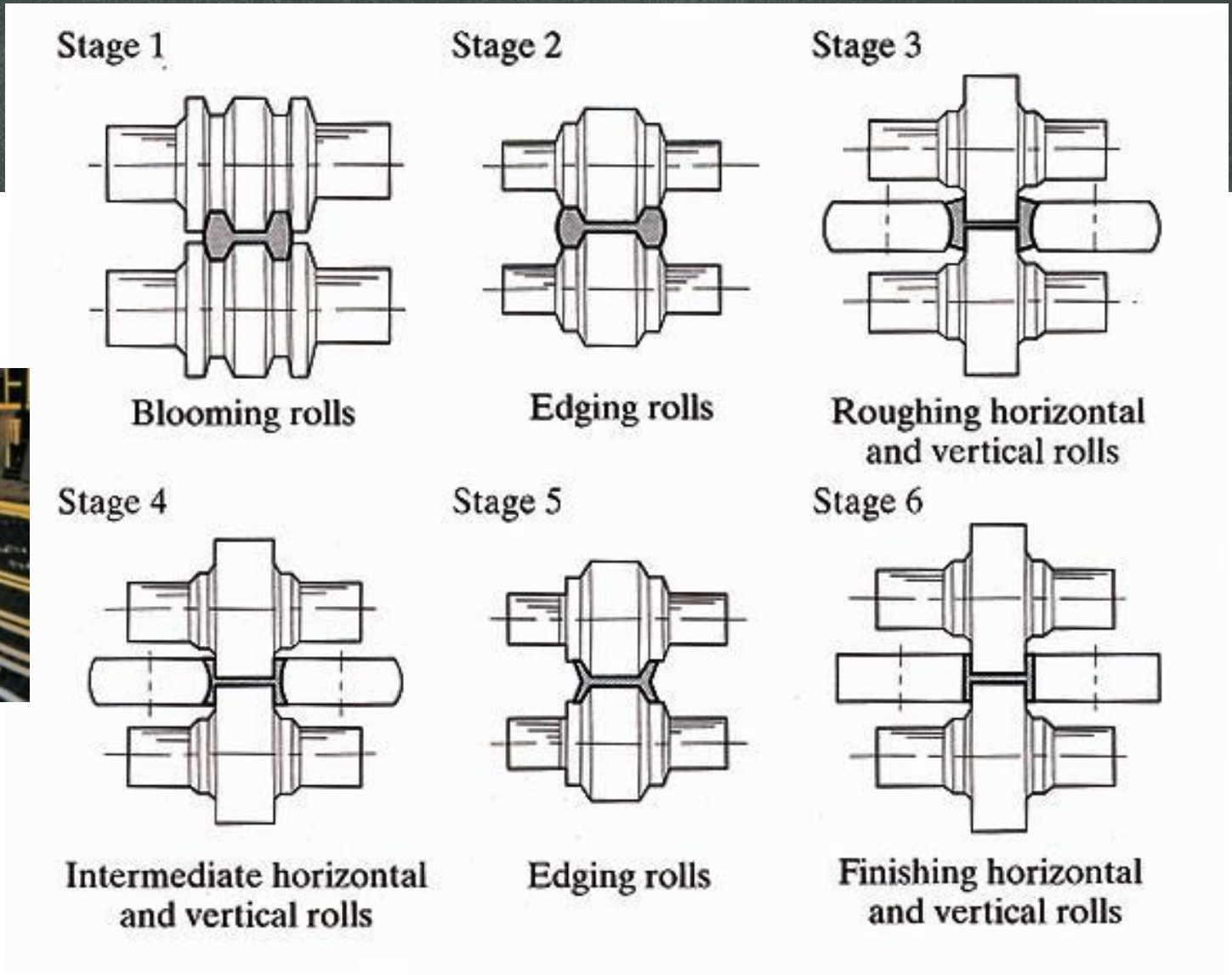


Produtos

* Planos (chapas, tiras, etc...)

* Não-planos (tubos, barras, cantoneiras, trilhos, ...)




Stage 1
Blooming rolls
Stage 2
Edging rolls
Stage 3
Roughing horizontal and vertical rolls
Stage 4
Intermediate horizontal and vertical rolls
Stage 5
Edging rolls
Stage 6
Finishing horizontal and vertical rolls

Terminologia – produtos laminados – planos (NBR 6215:2011)

- Placas
  - Espessura: > 80 mm
  - Seção retangular
  - Fabricação sem bobinamento por laminação a quente

- Chapas grossas
  - Largura: > 600 mm
  - Espessura: 5 - 12.7 mm
  - Fabricadas em bobinas utilizando laminação a quente

- Chapas finas
  - Largura: > 600 mm
  - Espessura: 0.3 - 5 mm
  - Fabricadas em bobinas, podendo passar por etapas final de laminação a frio e recozimento

Terminologia – produtos laminados – longos (NBR 6215:2011)

- Barras
  - Perfil diverso
  - Laminados a quente
- Fio máquina
  - Diâmetro: > 5mm
  - Secção redonda
  - Fabricação em bobinas por laminação a quente
- Vergalhões nervurados
  - Laminados a quente
- Perfis Leves e Médios
  - Laminados a quente
  - Seção em “T”, “U,” trilhos
- Perfis Pesados
  - Laminados a quente
  - Dimensões da secção transversal alcançam 500 mm
  - Secção em “H”, “I”, “U”

Laminação

Laminação a quente

- Laminador primário de desbaste (semiacabados, fundidos, ...)
- Expansão da largura do lingote
- Retirada de carepa
- Laminação de planos e longos
- Aços: $T_{inicial}$: 1100°C a 1300°C até T_{final} 700°C a 900°C

Laminação a frio

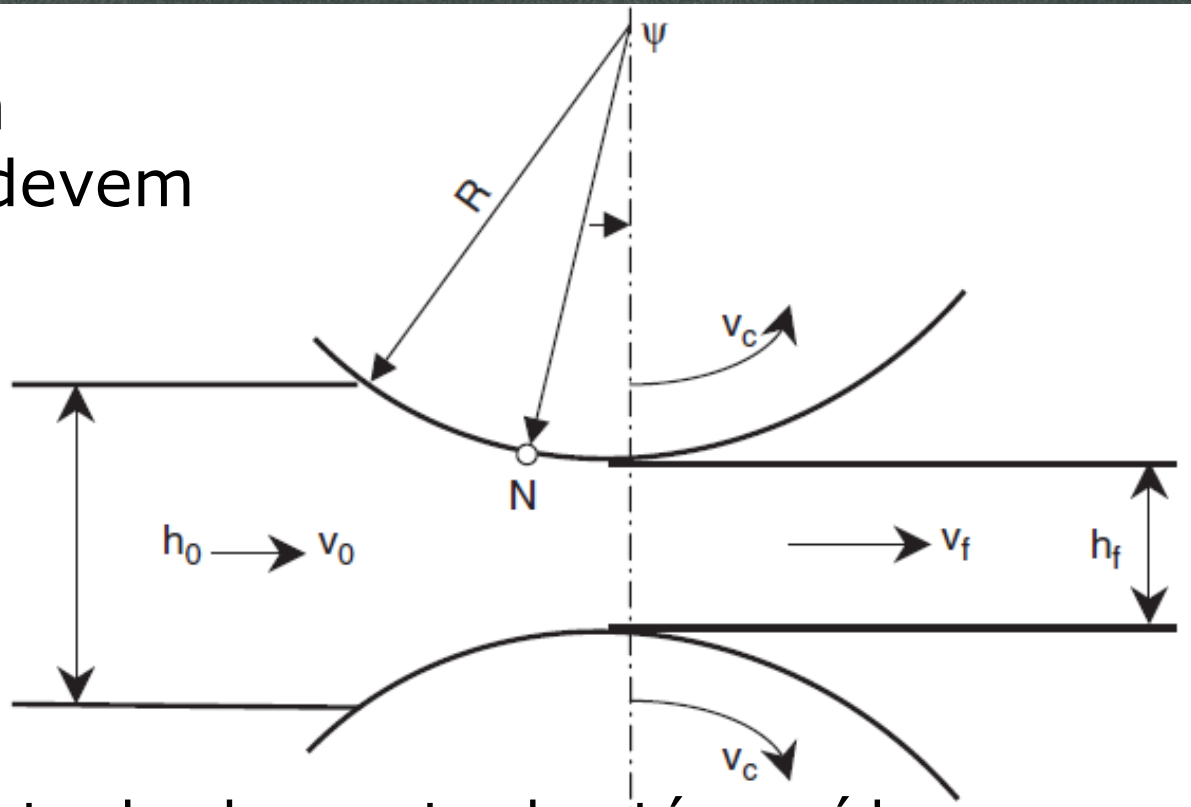
- Chapas finas, tiras a frio e folhas
- Acabamento superficial
- Encruamento final
- *Back tension* e *front tension* (tração a ré e avante)
- Redução total varia entre 50 a 90%

Forças e relações geométricas

- Relação: vel. inicial e vel. final – Sem aumento na largura, volumes iguais devem passar pelo laminador

$$b\ h_0\ v_0 = b\ h_f\ v_f$$

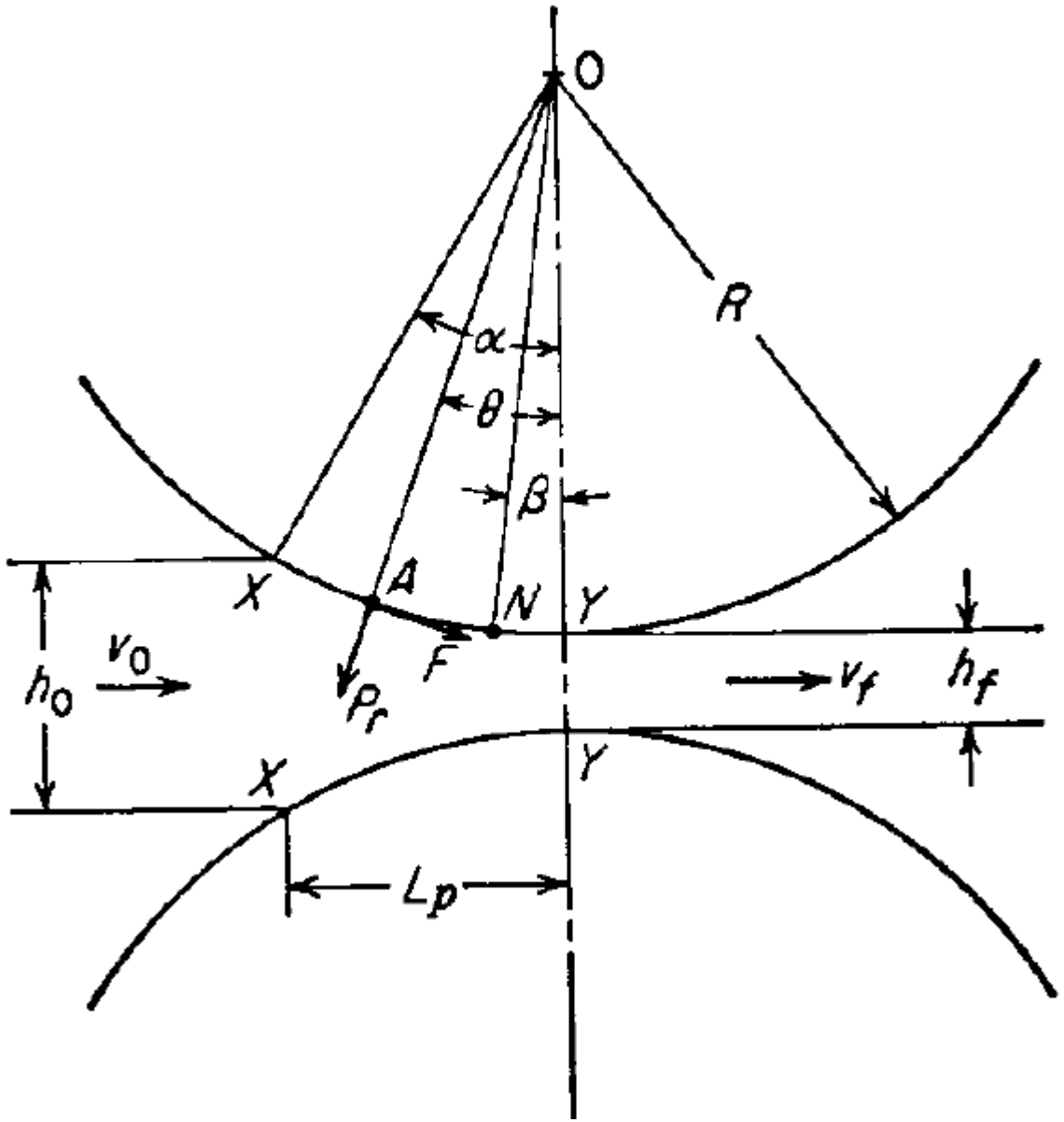
$$\boxed{v_f = {}^{h_0}\!/_{h_f}\ v_0}$$



- A velocidade da placa cresce continuamente desde a entrada até a saída
- Existe um ponto em que a velocidade da placa será exatamente igual à velocidade dos cilindros – Ponto Neutro, N (ponto sem deslizamento)

Forças e relações geométricas

- Em qualquer ponto na superfície da chapa, atuação de duas forças: tangencial de atrito (F) e força radial do cilindro (P_r)
- Ponto A: $v_{chapa} < v_{cilindro}$ – força de atrito em direção ao ponto neutro: empurra o metal na direção dos rolos
- Em um ponto após N, a chapa se move mais rapidamente que o rolo e o atrito será contrário (também em direção ao ponto N)

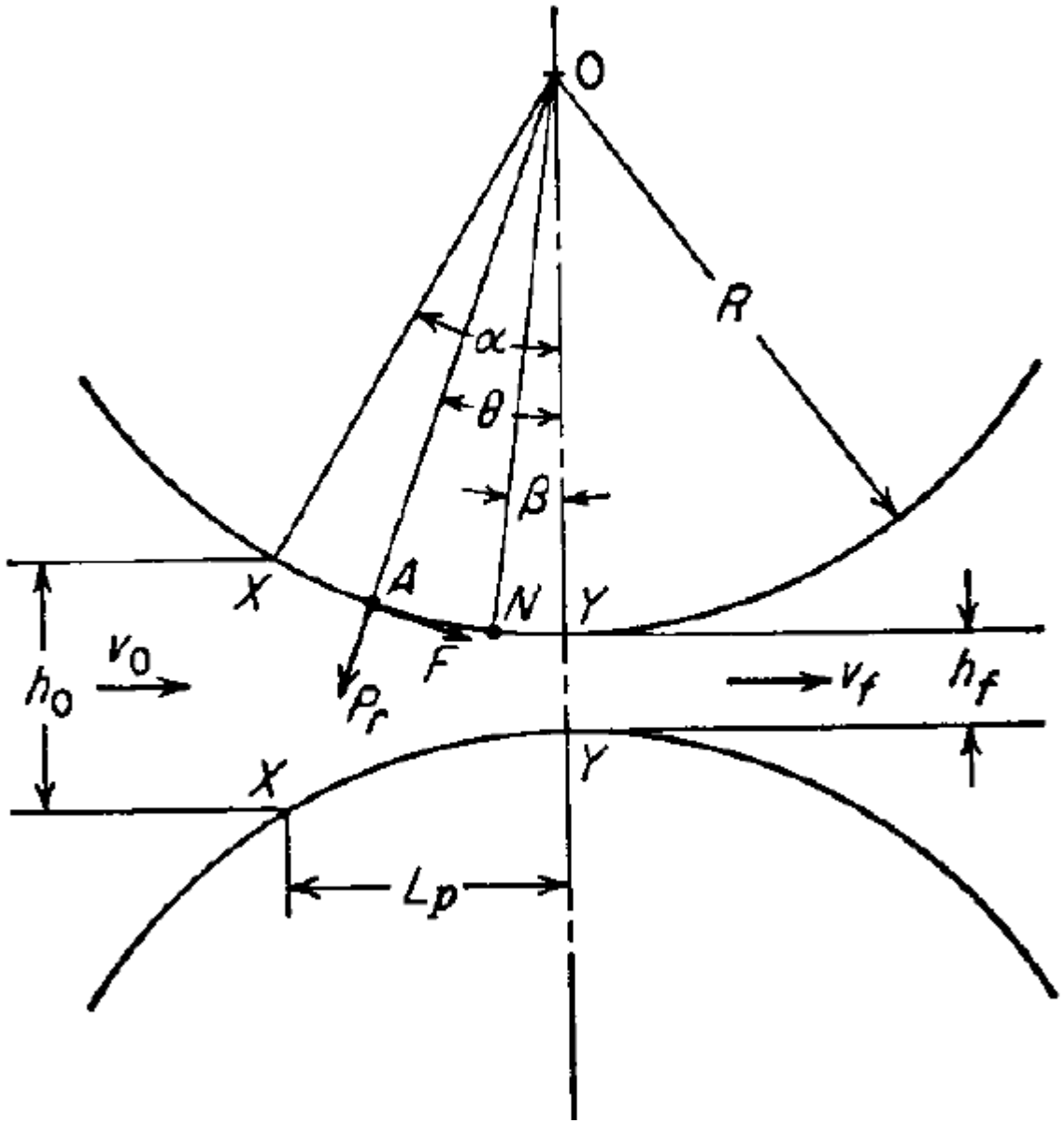


Forças e relações geométricas

- P_r – carga de laminação (força com que os cilindros comprimem o metal)
- Área de contato entre os cilindros e a chapa será o produto entre o arco de contato, L e a espessura, b

$$L = \left[R\left(h_0 - h_f\right) - \frac{(h_0 - h_f)^2}{4})\right]^{1/2}$$

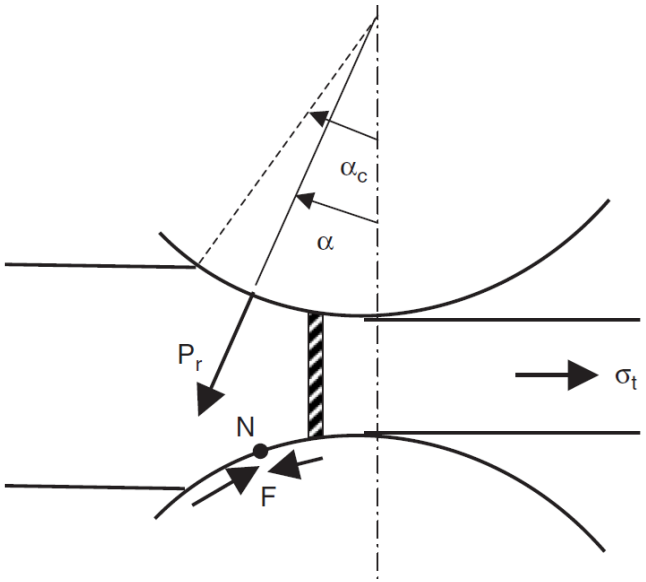
$$\approx \left[R\left(h_0 - h_f\right)\right]^{1/2}$$



Forças e relação geométrica

- Pressão de deformação média:

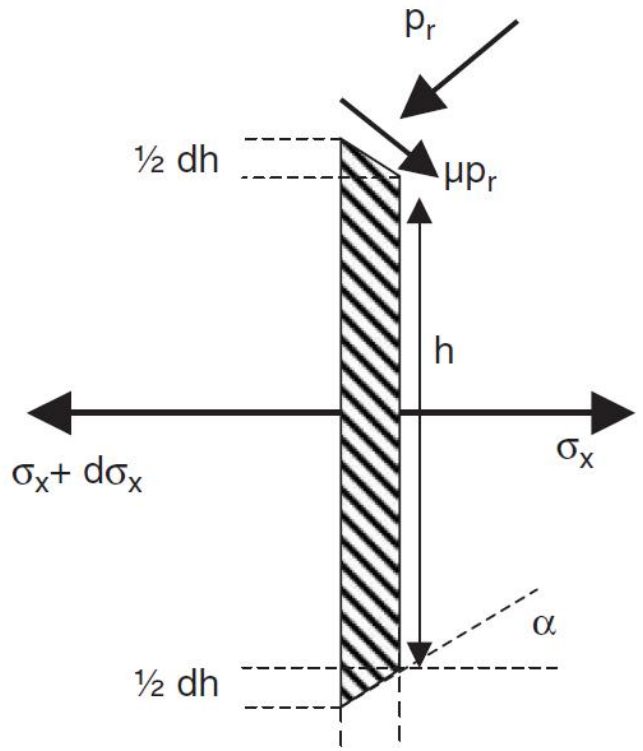
$$\bar{P} = \bar{\sigma}\frac{1}{\frac{\mu L}{h}}\left(e^{\frac{\mu L}{h}} - 1\right)$$

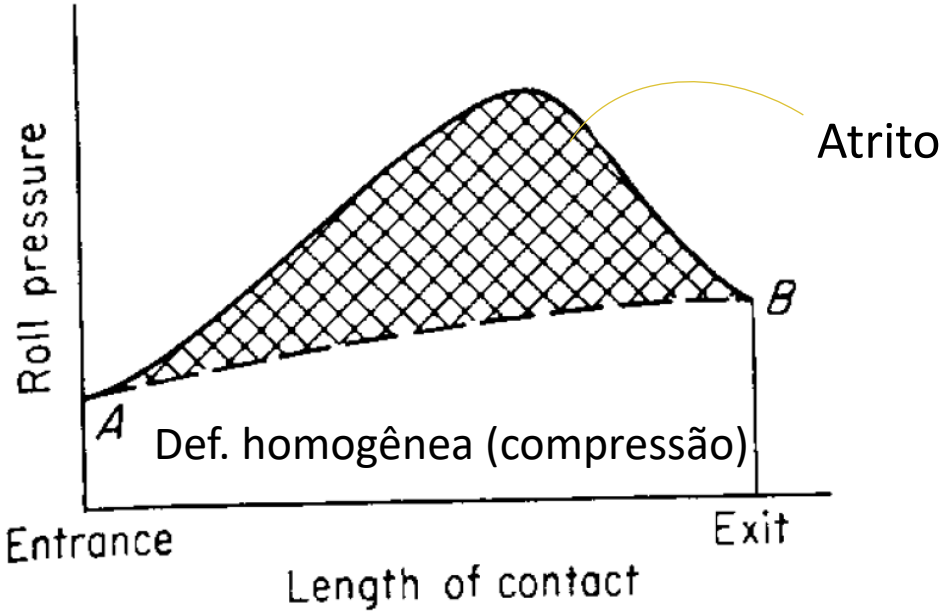


A carga P será máxima exatamente no ponto neutro

Área sob a curva é proporcional à carga de laminação

Forma da curva: determina o torque e a potência para a redução





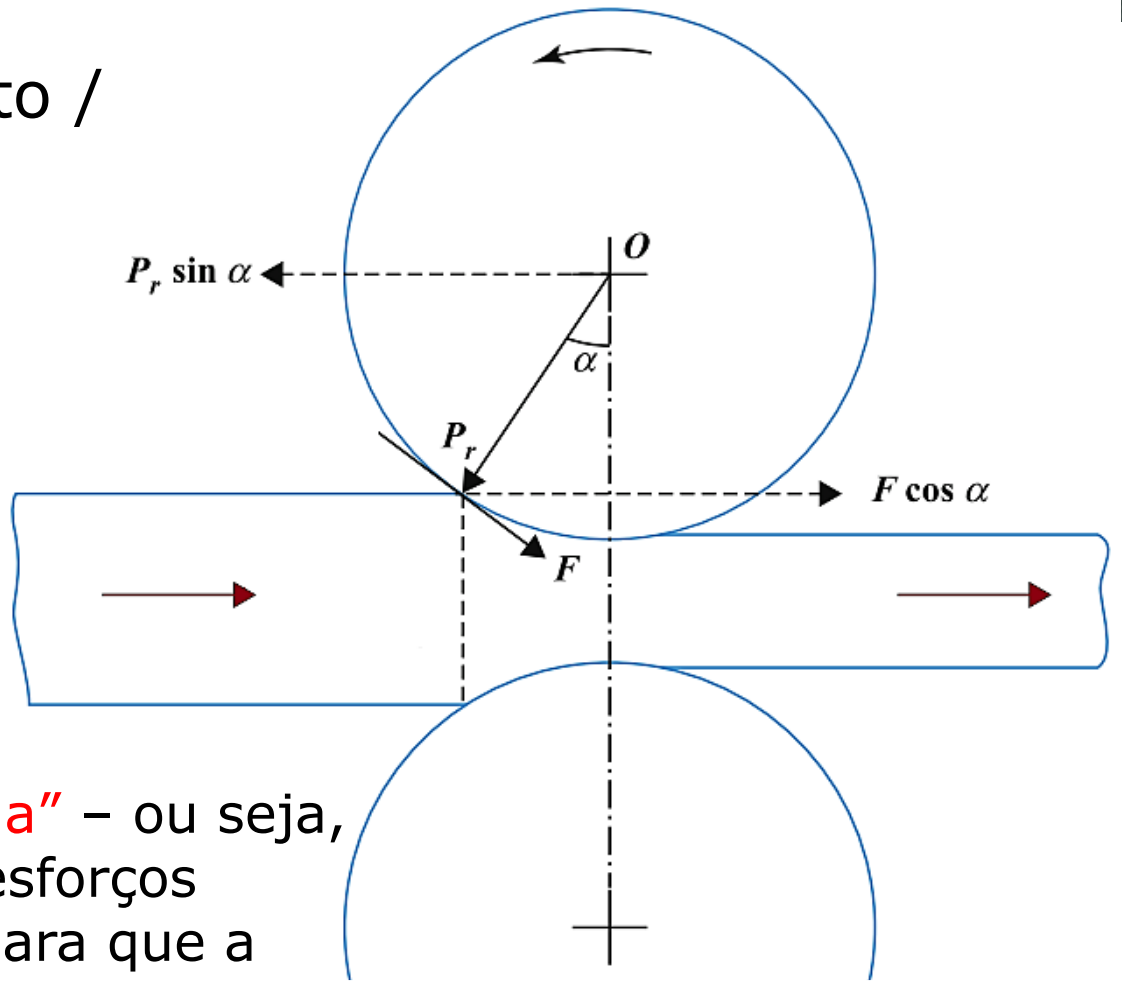
Forças e relações geométricas

- Ângulo α corresponde ao ângulo de contato / ângulo de ataque
- Para que a chapa entre no laminador, a componente horizontal da força de atrito deve ser maior do que a componente horizontal da pressão de laminação

$$F \cos \alpha > P \sin \alpha$$

$$F = \mu P$$

$$\mu > \tan \alpha$$

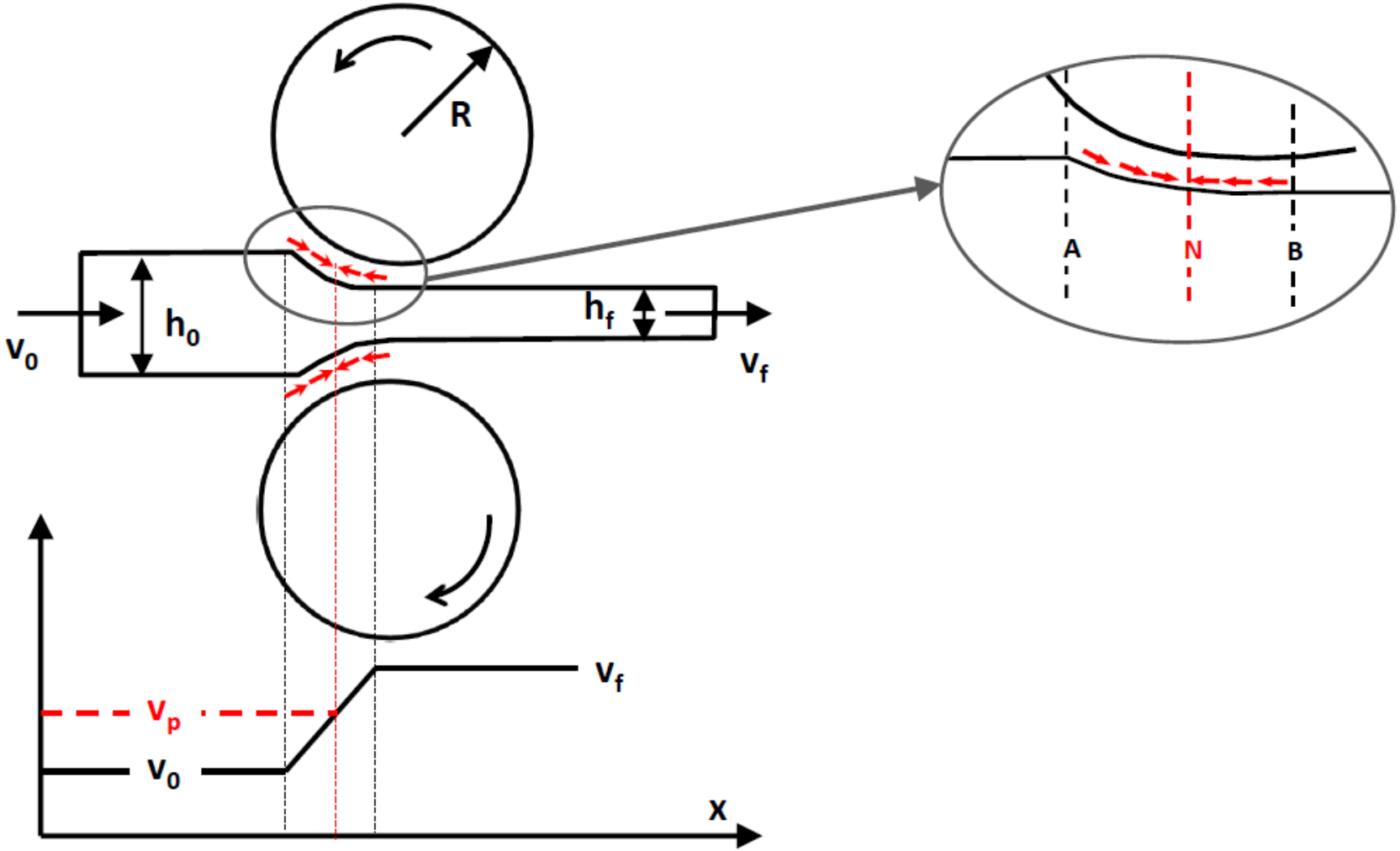


Condição de "mordida" – ou seja, sem a aplicação de esforços externos, condição para que a chapa entre dentro do laminador

Forças e relações geométricas

- Condição de mordida

$$\mu > \tan \alpha$$



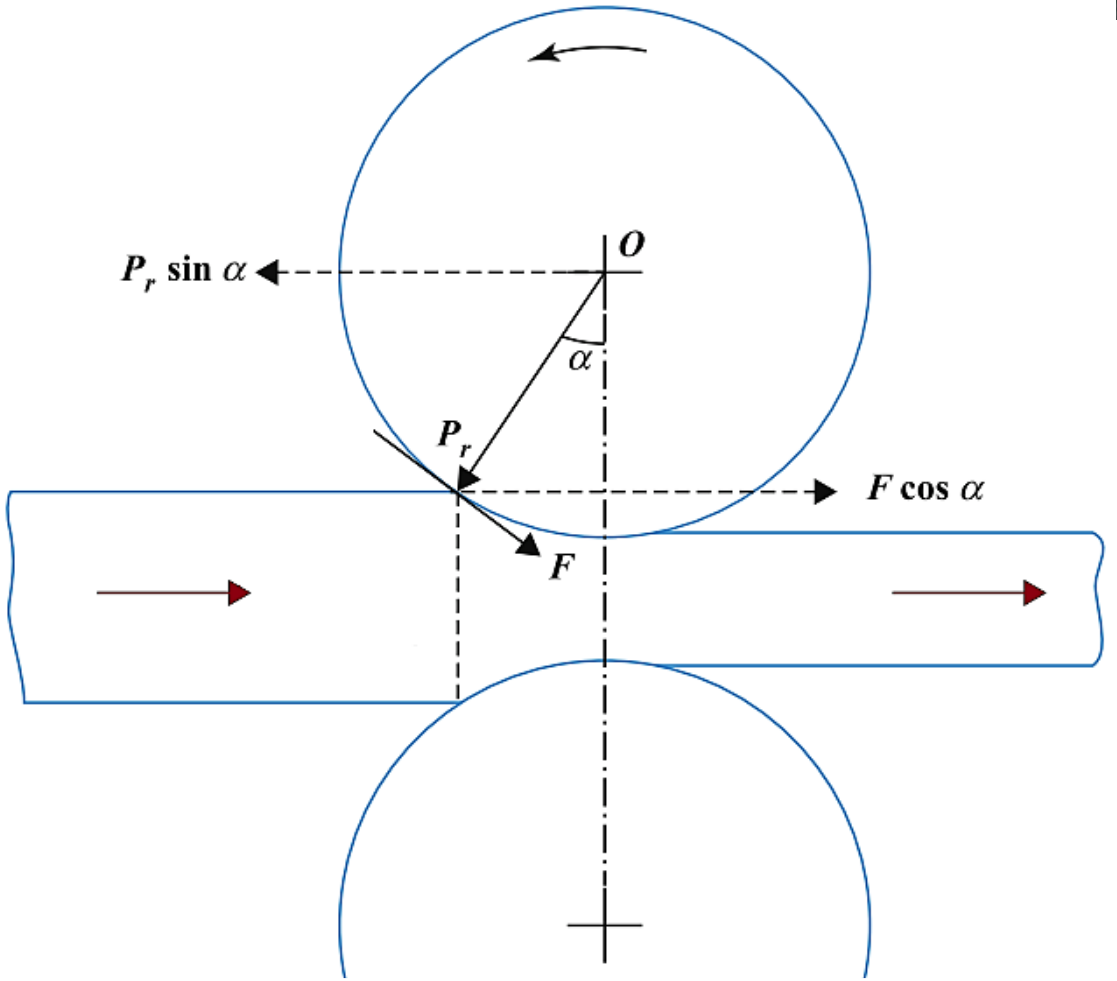
Forças e relações geométricas

- Lembrando que

$$L \approx [R\ (\Delta h)]^{1/2}$$

$$\tan\alpha = \frac{L}{R - \Delta h/2} \approx \frac{[R\ (\Delta h)]^{1/2}}{R - \Delta h/2} \approx \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

$$(\Delta h)_{max} = \mu^2 R$$



Cargas na laminação

Para a redução nas cargas de laminação, é possível:

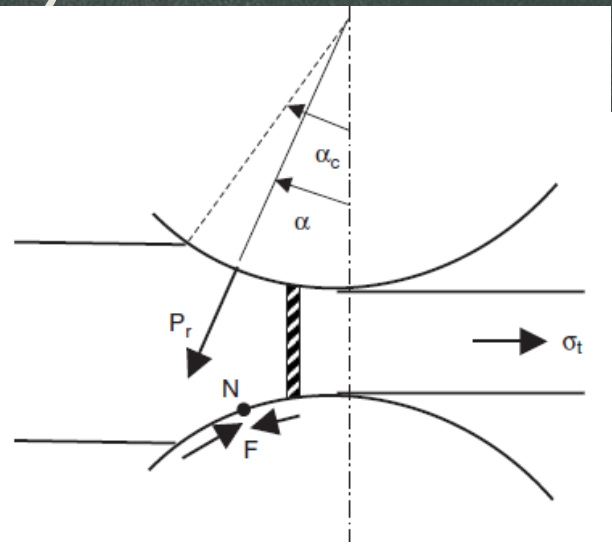
$$Q = \frac{\mu L}{h}$$

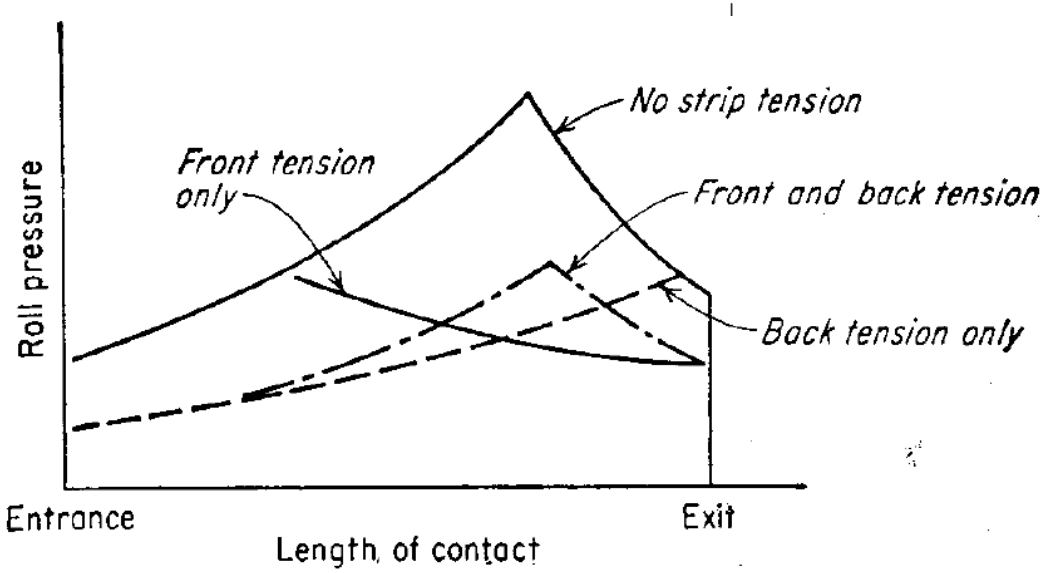
- Reduzir o valor de Q:
  - Redução do valor de L (ou seja, reduzindo R ou Δh)
  - Redução no atrito – reduz-se o atrito ao máximo possível
- Redução no diâmetro dos cilindros (reduz-se o valor de R e de L), porém há um limite físico, de forma que há uma redução na rigidez do equipamento -> cilindros podem sofrer arqueamento ou achatamento

$$\bar{P} = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}_0 \frac{1}{Q} (e^Q - 1)\, b \sqrt{R\, \Delta h}$$

Front or back tension (Tensões avante e de ré)

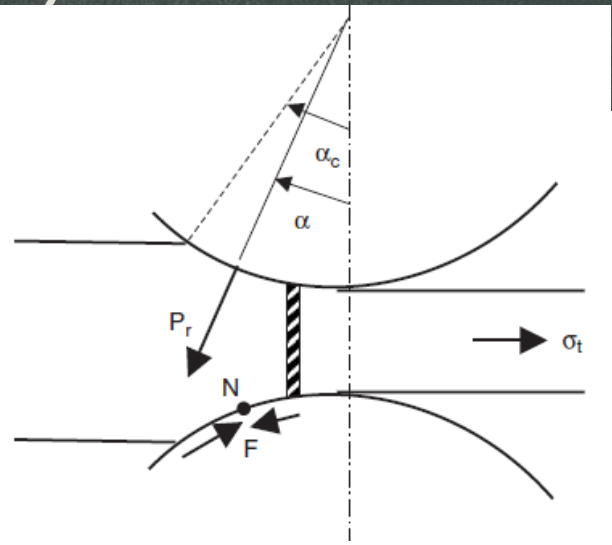
- Aplicação de "tração a ré": movimentação da linha neutra para a saída da chapa, até que a velocidade de saída seja exatamente a velocidade dos cilindros
- "Tração frontal" também reduz as cargas, porém será menos efetivo
- Redução nas pressões de laminação e na energia associada ao atrito -> efeito das trações: critério de Von Mises no estado plano
- Melhor cenário para a redução nas cargas: aplicação de ambas as tensões





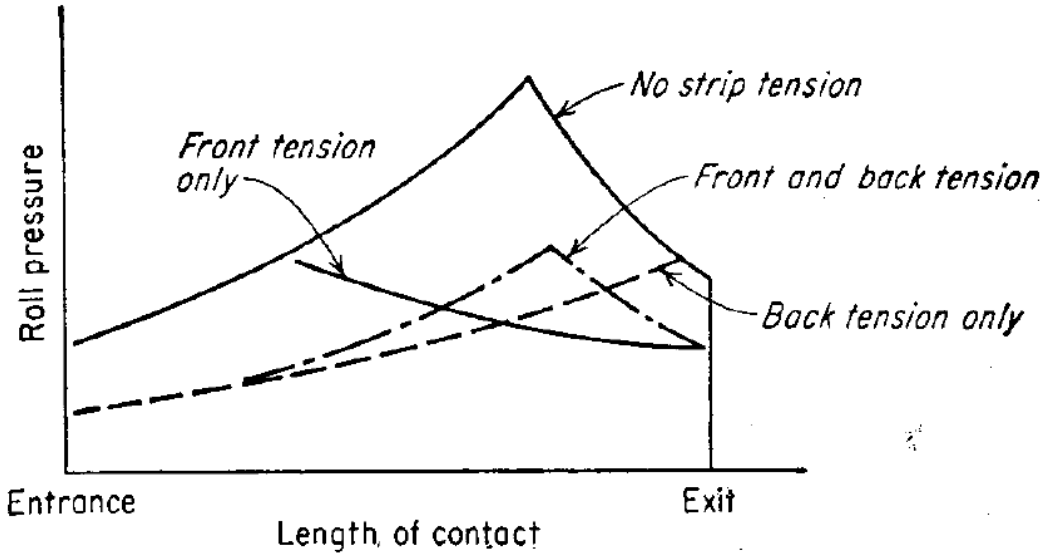
Front or back tension (Tensões avante e de ré)

- Aplicação de tração reversa e avante: reduzem as pressões de laminação, reduz o desgaste da ferramenta e aumenta a uniformidade da chapa



$$\bar{P}_2 = \bar{P}\left(1 - \frac{\sigma_b + \sigma_f}{\bar{\sigma}}\frac{\beta}{\alpha}\right)$$

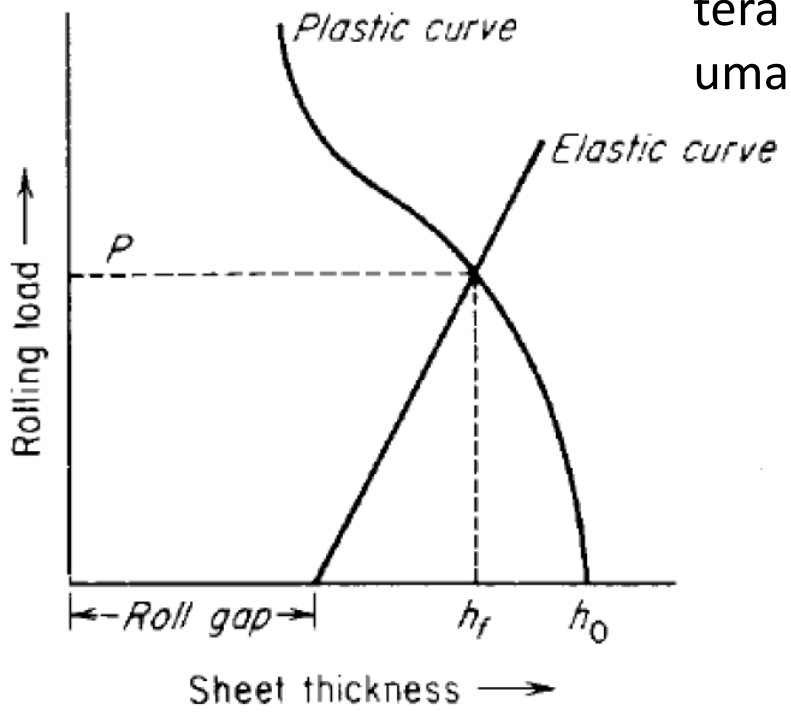
$\bar{P}$ será a carga na laminação com mesma redução porém sem tração reversa e tração avante
σ_b corresponde à tração reversa
σ_f corresponde à tração avante
$\bar{\sigma}$ corresponde à tensão de escoamento do material
α corresponde ao ângulo de contato
β corresponde ao ângulo sem deslizamento (ponto N)



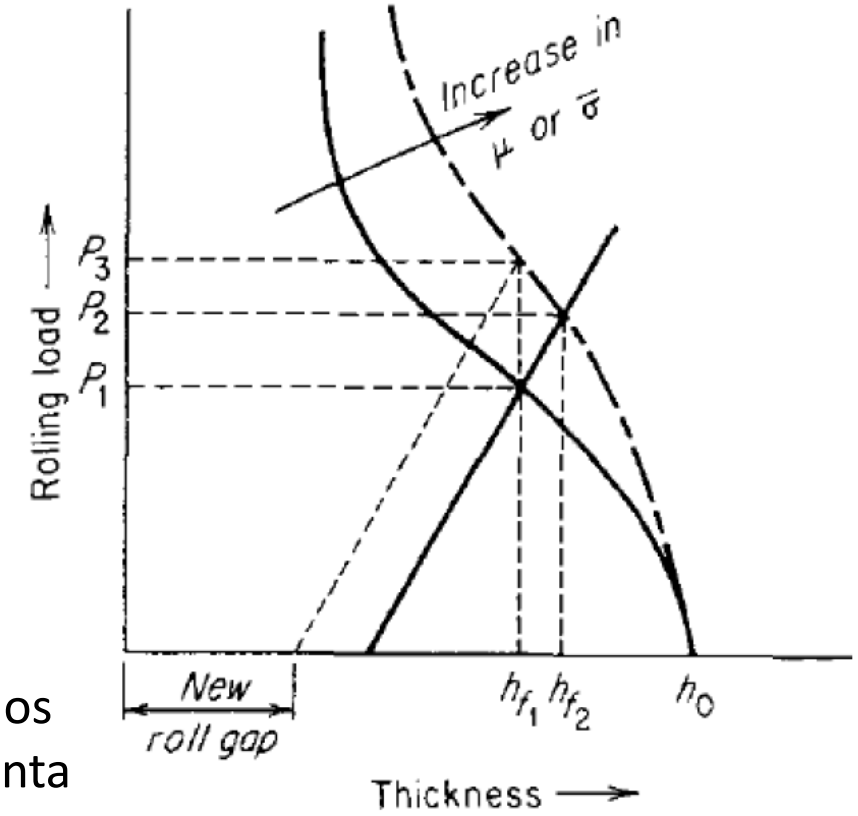
Controle dos laminadores

- Curvas: comportamento plástico do material e curva de carregamento do laminador (elástico)

Uma chapa com espessura h_0 terá espessura final h_f com uma carga aplicada de P



Aumento no atrito, redução na temperatura, ... -> aumento na pressão de laminação e aumento na espessura final (def. elástica do cilindro)

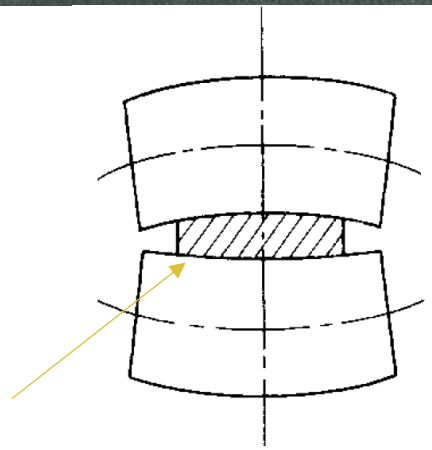


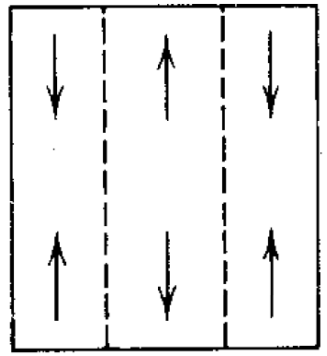
Para manter a mesma espessura final, deve-se diminuir a distância entre os rolos porém a carga aumenta

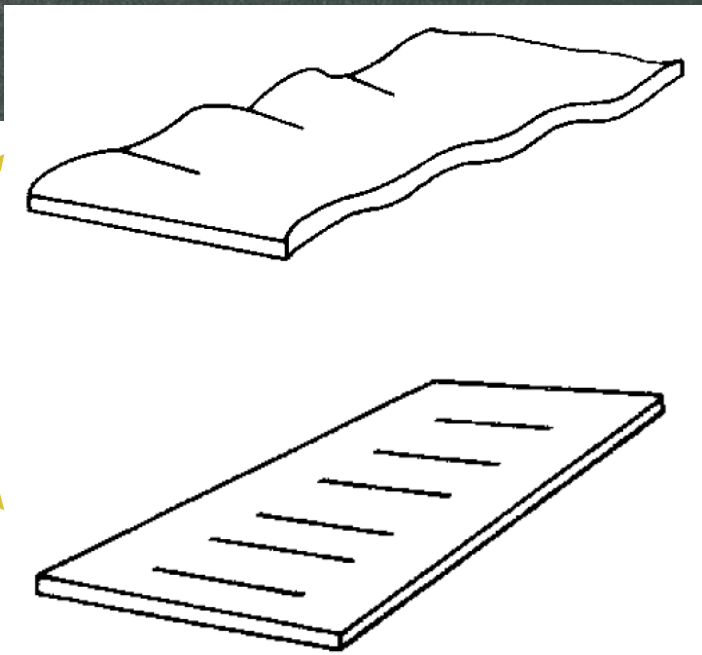
Defeitos na laminação

- Deformação elástica dos rolos

Maior redução de espessura nas bordas

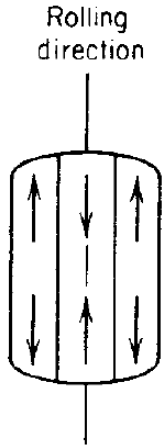


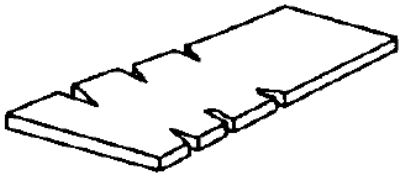




Compressão nas bordas e tração no centro

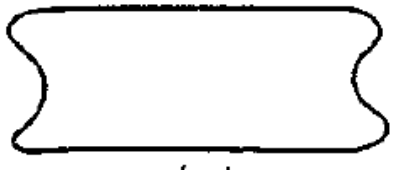
- Trincamento: os elementos tendem a espalhar lateralmente, com maiores restrições no centro da chapa devido ao atrito -> tração nas bordas





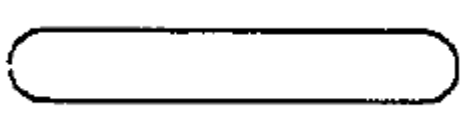
Defeitos na laminação

- Deformações restritas na superfície (pequenas reduções, por exemplo)



Material saliente não se deforma sob compressão ao longo do passes subsequentes e há o surgimento de trincas superficiais

- Grandes reduções: tendência do material se expandir lateralmente (abaulamento)



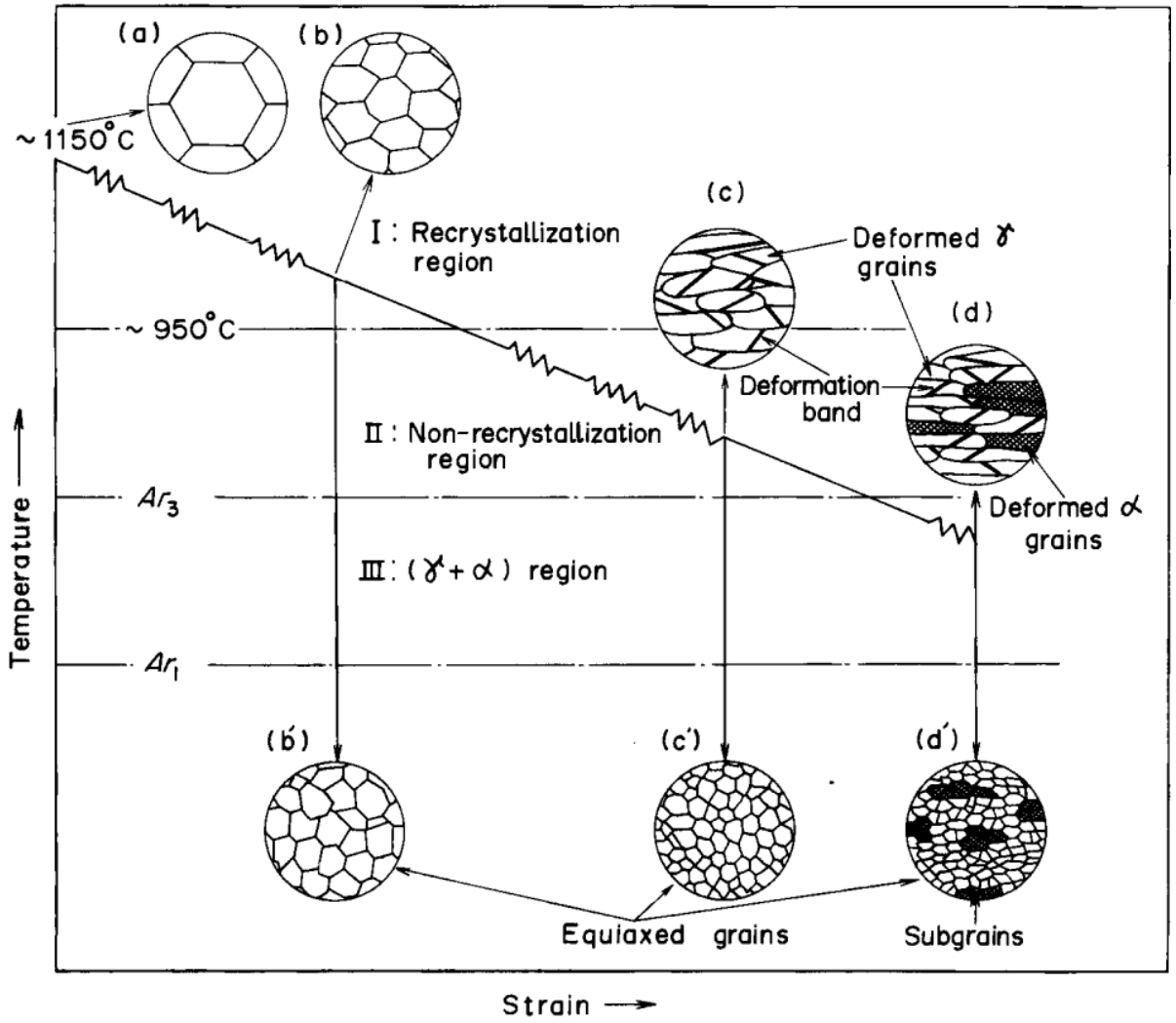
Tensões de tração no centro da espessura

- Condição especial: fator metalúrgico no centro da chapa (porosidade, trincas, segundas fases, ...) gera o defeito de "rabo de peixe" ou "boca de jacaré"

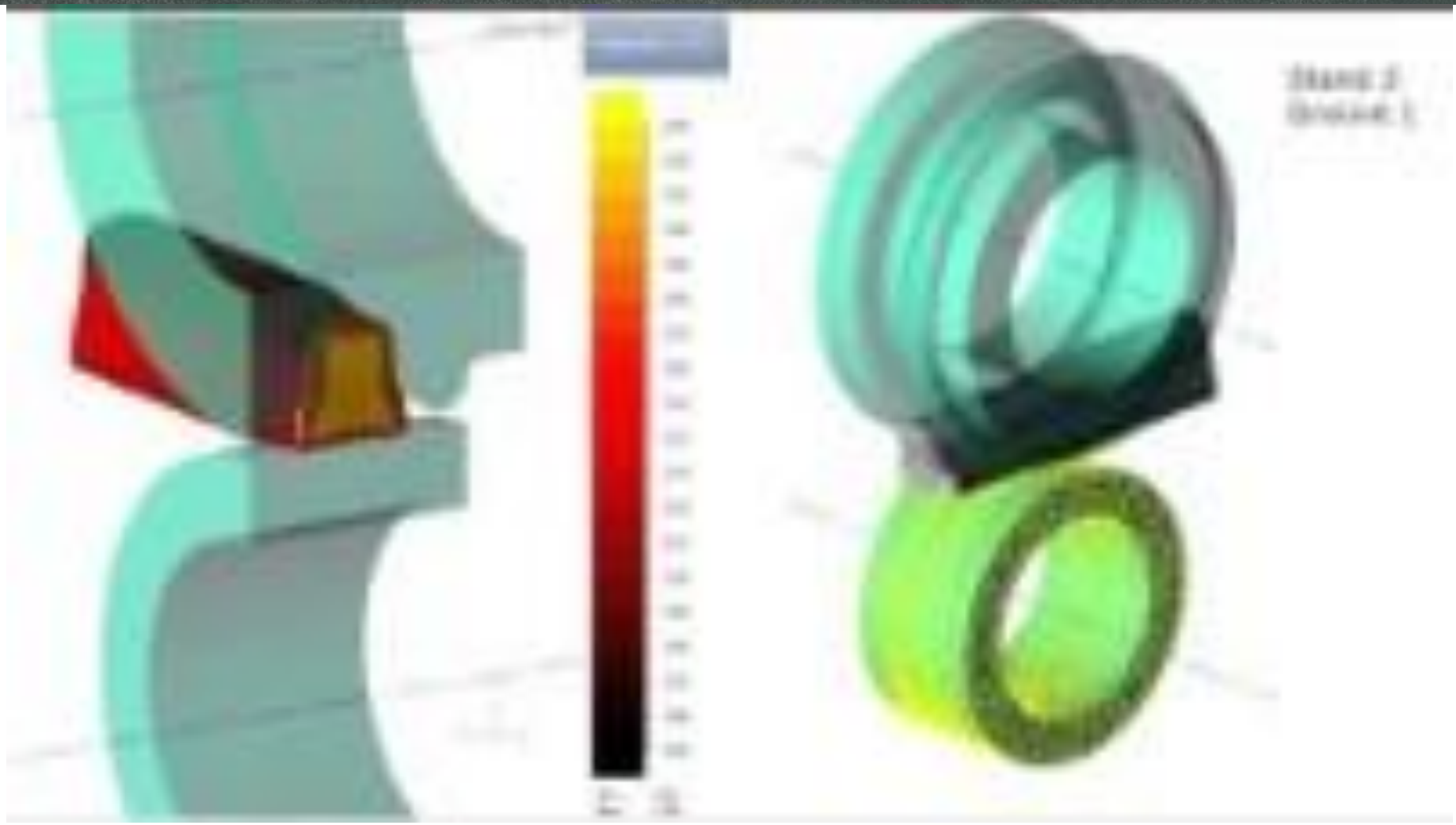
Evita-se este tipo de defeito (assim como trincas superficiais), aparando-se as arestas em cada passe de laminação ou restringindo o espalhamento lateral

Exemplo -> laminação controlada de aços

- Refino de grão austenítico levará à uma estrutura ferrítica mais refinada



QForm



Situações Problemas

1. Uma fábrica está tendo alta taxa de peças forjadas com trincas internas. O que pode estar causando isso e como corrigir o processo?
2. Uma empresa siderúrgica está enfrentando um problema durante a laminação de chapas de **aço carbono**. As chapas estão saindo com **espessura irregular, com variações acima da tolerância especificada**, além da presença de **marcas de dobra e trincas superficiais**. Como engenheiro de processos, o que pode estar causando esses defeitos e quais medidas você recomendaria para corrigir o problema?
3. Uma empresa precisa fabricar um eixo com **alta resistência mecânica e baixa porosidade**. Você recomendaria forjamento ou laminação? Por quê? Qual o tipo e equipamento ideal? Como evitar defeitos?

Situações Problemas

- Uma fábrica está tendo alta taxa de peças forjadas com trincas internas. O que pode estar causando isso e como corrigir o processo?

Temperatura de forjamento inadequada
•**Muito baixa:** o material apresenta baixa ductilidade e não flui corretamente, favorecendo a nucleação de trincas internas.
•**Muito alta:** pode causar crescimento de grão excessivo e oxidação interna (se em atmosfera não controlada), o que também favorece trincas.
Taxa de deformação muito alta (impacto rápido)
•Forjamentos com martelo ou com velocidade excessiva podem gerar **gradientes de tensão elevados**, levando à formação de trincas internas, especialmente em peças grandes.
Projeto inadequado da matriz
•Canais de escoamento mal projetados ou regiões com altos gradientes de espessura causam **concentração de tensões internas**, favorecendo a formação de trincas.
Distribuição de temperatura não homogênea na peça
•Diferenças na temperatura entre o núcleo e a periferia causam **diferenças de deformação** e geram trincas internas por tensão residual.
Material com defeitos pré-existentes ou composição inadequada
•Inclusões, segregações ou bolhas internas favorecem o início das trincas durante o forjamento.

Situações Problemas

- Uma fábrica está tendo alta taxa de peças forjadas com trincas internas. O que pode estar causando isso e como corrigir o processo?

Problema	Ação sugerida
Temperatura inadequada	Otimizar a janela de temperatura conforme o tipo de aço ou liga.
Velocidade muito alta	Reduzir a velocidade de deformação ou usar prensa hidráulica no lugar de martelo.
Projeto da matriz	Redesenhar canais de fluxo e suavizar transições geométricas para evitar regiões de alta concentração de tensões.
Distribuição de temperatura	Melhorar o aquecimento da peça (pré-aquecimento uniforme) e uso de termopares para controle de temperatura.
Qualidade do material	Implementar controle de qualidade de matéria-prima, realizar análise química para detecção de defeitos internos.

Situações Problemas

- Uma empresa siderúrgica está enfrentando um problema durante a laminação de chapas de **aço carbono**. As chapas estão saindo com **espessura irregular, com variações acima da tolerância especificada**, além da presença de **marcas de dobra e trincas superficiais**. Como engenheiro de processos, o que pode estar causando esses defeitos e quais medidas você recomendaria para corrigir o problema?

Defeito	Possível causa técnica
Espessura irregular	- Pressão de laminação inconsistente - Cilindros desalinhados ou com desgaste - Controle de velocidade ou temperatura inadequado
Marcas de dobra	- Falta de controle de planicidade - Tensão residual elevada - Resfriamento desigual
Trincas superficiais	- Temperatura de laminação muito baixa - Presença de inclusões ou microtrincas no material inicial - Reduções de espessura muito agressivas

Situações Problemas

- Uma empresa siderúrgica está enfrentando um problema durante a laminação de chapas de **aço carbono**. As chapas estão saindo com **espessura irregular, com variações acima da tolerância especificada**, além da presença de **marcas de dobra e trincas superficiais**. Como engenheiro de processos, o que pode estar causando esses defeitos e quais medidas você recomendaria para corrigir o problema?

Problema	Solução técnica sugerida
Espessura irregular	- Retificar ou alinhar os cilindros de laminação - Implementar controle mais preciso de temperatura e velocidade
Marcas de dobra	- Controlar uniformidade de resfriamento - Ajustar plano de redução entre passes
Trincas superficiais	- Aumentar temperatura inicial do material (dentro do limite) - Reduzir o grau de deformação por passe - verificação microestrutural da matéria-prima

Situações Problemas

- Uma empresa precisa fabricar um eixo com **alta resistência mecânica e baixa porosidade**. Você recomendaria forjamento ou laminação? Por quê? Qual o tipo e equipamento ideal? Como evitar defeitos?

•O **forjamento** é mais adequado para peças que exigem alta resistência mecânica e estrutura interna homogênea, pois promove:
Refinamento de grão.
Melhor compactação do material, reduzindo significativamente porosidade interna.
Orientação favorável das fibras metálicas (direção do fluxo de material), aumentando resistência à fadiga.

A laminação é excelente para chapas, perfis e grande produtividade, mas não garante o mesmo controle de integridade interna e resistência específica para geometrias como eixos.

Tipo de Forjamento: Forjamento em matriz fechada
Permite produção de eixos com geometria precisa e boa qualidade superficial.

Qual equipamento?
Prensa hidráulica, pois oferece deformação mais lenta e controlada, melhor preenchimento da matriz e menor risco de trincas em comparação com martelo pneumático.

Situações Problemas

- Uma empresa precisa fabricar um eixo com **alta resistência mecânica e baixa porosidade**. Você recomendaria forjamento ou laminação? Por quê? Qual o tipo e equipamento ideal? Como evitar defeitos?

Principais Defeitos	Causa comum	Possíveis Soluções
Trincas internas	Baixa temperatura ou deformação rápida	Controle rigoroso da temperatura de forjamento e taxa de deformação
Preenchimento incompleto	Falta de material ou matriz mal dimensionada	Projeto correto da matriz e volume de carga adequado
Rebarbas excessivas	Excesso de material ou folga na matriz	Ajustar volume e folgas laterais na matriz
Inclusões não deformadas	Impurezas no material	Seleção adequada do material e tratamento térmico prévio, se necessário

Processos de conformação de metais

Processos: compressão direta

Forjamento

Laminação

Processos: compressão indireta

Extrusão

Trefilação

Conformação de chapas

Estiramento

Dobramento